

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**REDUCCIÓN DE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE  
DOLOMITA A NIVEL DE LABORATORIO.**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**Presentado por:**

**PEREZ SEGURA PAPI WEBSTER**

**Tingo María – Perú**

**2025**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**Tingo María- Perú**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 042-2025-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 04 de abril 2025, a horas 9: 00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“REDUCCIÓN DE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE DOLOMITA A NIVEL DE LABORATORIO”**

Presentado por el Bachiller: **PEREZ SEGURA, PAPI WEBSTER**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 14 de abril de 2025

**Dr. EDILBERTO CHUQUILIN BUSTAMANTE**  
**PRESIDENTE**

**Mtblgo. MSc. LUIS A. SANCHEZ ROMERO**  
**MIEMBRO**

**Ing. MSc. ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ**  
**MIEMBRO**



**Dr. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR**  
**ASESOR**



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN - DGI  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL - UNAS

Correo: [repositorio@unas.edu.pe](mailto:repositorio@unas.edu.pe)



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

**CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 119 - 2025 - CS-RIDUNAS**

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

**CERTIFICA QUE:**

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
REDUCCIÓN DE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE DOLOMITA A NIVEL DE LABORATORIO	PEREZ SEGURA PAPI WEBSTER	<b>20 %</b> <b>Veinte</b>

Tingo María, 28 de abril de 2025

  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN  
**Dr. Tomas Menacho Mallqui**  
JEFE

C.C. Archivo



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

## VICERRECTORADO DE INVESTIGACION DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

### REGISTRO DE PROYECTO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

<b>Universidad</b>	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
<b>Facultad</b>	: Recursos Naturales Renovable
<b>Escuela Profesional</b>	: Ingeniería Ambiental
<b>Título de Tesis</b>	: Reducción de los niveles de eutrofización mediante el uso de dolomita a nivel de laboratorio.
<b>Objetivo General</b>	: Evaluar la reducción de los niveles de eutrofización mediante el uso de dolomita a nivel de laboratorio.
<b>Autor de la Tesis</b>	: Perez Segura Papi Webster
<b>DNI</b>	: 47703562
<b>Correo Electrónico</b>	: papi.perez@unas.edu.pe
<b>Asesores de Tesis</b>	: Dr. Paredes Salazar José Luis
<b>Área de Investigación</b>	: Ciencia y tecnología ambientales.
<b>Grupo de Investigación</b>	: Ciencia y tecnología ambientales.
<b>Línea de Investigación</b>	: Tratamientos de aguas.
<b>Lugar de Ejecución</b>	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
<b>Fecha de inicio</b>	: 22 de setiembre 2021
<b>Fecha de termino</b>	: 22 de setiembre 2023
<b>Presupuesto</b>	: S/. 1677.93
<b>Financiamiento</b>	: Propio ( x )    FEDU (    )    Externo (    )

Papi Webster Perez Segura  
Tesisista

José Luis Paredes Salazar  
Asesor

## **DEDICATORIA**

### **A Dios:**

Por brindarme vida, salud y sabiduría necesaria para enfrentar cualquier desafío que se presentara y darme la fuerza necesaria durante la carrera profesional.

### **A mi Abuelita:**

La mamá grande, un ángel que siempre cuida y guía mis pasos.

### **A mi Padre, Tios(as) y hermanos:**

Por su apoyo, consejos y formación que me brindaron, por enseñarme a actuar siempre con valores.

## **AGRADECIMIENTO**

- A mi padre e esposa y tios (as) por su apoyo, esfuerzo, guía durante las etapas de mi vida.
- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por darme la oportunidad de formarme como profesional.
- A la Facultad de Recursos Naturales, a los docentes por brindar sus conocimientos y consejos necesarios para mi desempeño profesional.
- A mi asesor Dr. Paredes Salazar Jose Luis, agradecido por el respaldo, tolerancia y dedicación que ha demostrado durante mi proceso de desarrollo profesional.
- A los miembros del jurado, Dr. Edilberto Chuquilin Bustamante, M.Sc. Abby Solange Da Cruz Rodríguez, M.Sc. Luis Alberto Sánchez Romero agradezco su apoyo, confianza, disposición y aporte durante la investigación desarrollada.
- A mis hermanos Gandhi, Johan, Victoria, Pedro y Sabino, por ser motivación en los estudios.
- A mis Amigos Angel, Yorqueens y Benjamin por su amistad, apoyo durante mi etapa universitaria.
- A Miriam por su apoyo y motivación durante la ejecución de la tesis.
- A todas aquellas personas que me han acompañado en este camino de aprendizaje y comparten mi éxito como el suyo propio.

## ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	2
Objetivo General:.....	2
Objetivos específicos .....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.2. Definición de eutrofización .....	6
2.3. Causas de la eutrofización .....	6
2.4. Efectos de la eutrofización .....	7
2.5. Usos de la dolomita .....	8
2.6. Reacción química de la dolomita con el nitrógeno y fósforo .....	9
2.7. Importancia de la dolomita en el tratamiento de aguas contaminadas .....	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	11
3.1. Lugar de ejecución.....	11
3.2. Materiales, equipos de laboratorio y reactivos .....	12
3.2.1. Materiales y equipos .....	12
3.2.2. Reactivos.....	12
3.3. Metodología.....	13
3.3.1. Determinación del desarrollo de la eutrofización del medio acuoso por la variación de la concentración de nutrientes a nivel de laboratorio.....	13
3.3.2. Determinación de la activación iónica de la dolomita en el medio acuoso por influencia del pH del agua a nivel de laboratorio.....	14
3.3.3. Determinación del nivel de eutrofización del agua por variación del pH y el periodo de exposición solar y presencia de dolomita a nivel de laboratorio.....	15
3.4. Criterios de estudio.....	16
3.4.1. Análisis estadístico.....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	19
4.1. Determinación del desarrollo de la eutrofización del medio acuoso por la variación de la concentración de nutrientes a nivel de laboratorio. ....	19

4.2.	Determinación de la activación iónica de la dolomita en el medio acuoso por influencia del pH del agua en a nivel de laboratorio. ....	22
4.3.	Determinación del nivel de eutrofización del agua por variación del pH y el periodo de exposición solar y presencia de dolomita a nivel de laboratorio. ....	24
V.	CONCLUSIONES.....	29
VI.	PROPUESTAS A FUTURO.....	30
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	31
VIII.	ANEXO.....	35
8.1.	Datos experimentales de la investigación.....	35
8.2.	Resultados del análisis estadístico con el software estadístico InfoStat.....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Variables de investigación.....	17
2. Niveles para los factores de la investigación.....	17
3. Matriz de diseño de la investigación .....	18
4. Caracterización fisicoquímica básica del agua contaminada de la investigación. ....	19
5. Análisis de variancia para la turbiedad por efecto de la concentración de nutrientes en para la determinación del desarrollo de eutrofización en el medio acuoso.....	20
6. Determinación de la variación de la apariencia del agua por valor de turbidez, a diferentes dosis de roca fosfórica en un periodo de 24 horas.....	20
7. Dureza total del agua en presencia de dolomita a diferentes valores de pH .....	22
8. Remoción de fósforo con dolomita a diferentes valores de pH y tiempos .....	24
9. Determinación experimental del efecto de la roca fosfórica en la apariencia del agua, relacionado por el valor de turbiedad .....	35
10. Determinación de la dureza del medio acuoso a diferentes tiempos y pH .....	36
11. Determinación experimental de fosfatos y cálculo de fósforo a diferentes tiempos de exposición y pH.....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. La eutrofización y los factores que la producen.....	6
2. Apariencia del agua superficial eutrofizada.....	8
3. Dolomita natural.....	9
4. Eficiencia de eliminación de diversos nutrientes con dolomita.....	10
5. Ubicación Geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	12
6. Proceso de generación de agua eutrofizada de la investigación.....	13
7. Procedimiento experimental para el acondicionamiento de la dolomita.....	14
8. Diseño de la investigación.....	16
9. Variación de la turbidez del medio acuoso con la aplicación de nutrientes.....	21
10. Variación de la dureza total de agua a diferentes pH y tiempos.....	23
11. Variación de la concentración de fósforo a diferentes pH y tiempos.....	27
12. Resumen estadístico básico de los resultados de los tratamientos.....	27
13. Gráfico de barras de los tratamientos aplicados a diferentes tiempos.....	28
14. Gráfico de barras de los tratamientos aplicados a diferentes rangos de pH.....	28
15. Análisis de varianza y prueba de Tukey para las medias de turbiedad.....	39
16. Prueba de Tukey de la interacción del factor tiempo (horas) y factor pH.....	39
17. Análisis de varianza de los datos experimentales.....	41
18. Aspecto de Dolomita utilizada en la investigación.....	42
19. Activación de la dolomita en medio acuoso.....	42
20. Roca fosfórica utilizada en la investigación.....	43
21. Determinación de dureza en las muestras a diferentes pH.....	43
22. Aspecto del agua residual utilizada para preparación del medio contaminado.....	44
23. Exposición de las unidades experimentales a radiación a diferentes periodos.....	44
24. Aspecto de las muestras turbias con indicios de eutrofización.....	45
25. Esquema experimental para evaluación del efecto de dolomita en remoción de fósforo.....	45
26. Lectura de fosfato en las muestras después del tratamiento.....	46

## RESUMEN

La investigación se realizó para conocer el efecto de la dolomita en el nivel de eutrofización mediante la remoción de fósforo. Se desarrolló a nivel de laboratorio donde se trabajó en dos etapas preliminares, la primera fue para determinar el potencial de los nutrientes obtenidos de tres pesos diferentes de roca fosfórica y expuestas a 24 horas de radiación, la segunda etapa preliminar fue para conocer las condiciones óptimas de activación de la dolomita, ajustando diferentes valores de pH del medio a diferentes periodos de tiempo de contacto y finalmente se experimentó mediante la aplicación de tratamientos a unidades experimentales de 1 L, preparado con agua destilada y agua contaminada, donde se aplicó la concentración de nutrientes provenientes de 75 g de roca fosfórica, se adicionó 100 g de dolomita en un medio acuoso a tres rangos de pH y tres periodos de exposición diferentes, al final de cada tratamiento, se determinó, la concentración de fosfatos remanente en cada muestra. Los resultados indicaron que la dolomita si es capaz de remover el fósforo y para el caso, el máximo porcentaje de remoción fue de 96.5% y se obtuvo en un período de 24 horas en el máximo rango de pH que fue 6.5 a 7. El análisis estadístico indicó, que el porcentaje de remoción de fósforo es significativamente diferente en los tres rangos de pH evaluados, y respecto a la remoción de fósforo a tres periodos de exposición, solo el valor obtenido a 24 horas difiere de los obtenidos a 48 y 72 horas.

**Palabras clave:** Eutrofización, dolomita, dureza, radiación solar, concentración de fósforo.

## **The Reduction of the Eutrophication Levels Through the Use of Dolomite on a Laboratory Level**

### **Abstract**

The research was done to understand the effect of dolomite on the eutrophication level through the removal of phosphorous. Was carried out at a laboratory level, where it was done in two preliminary stages, the first was to determine the potential of the nutrients obtained from three different weights of phosphoric rock and exposed for twenty four hours of radiation. The second preliminary stage was to understand the optimal conditions for the activation of the dolomite, adjusting different pH values from the medium during different time periods of contact, and finally, the experiment was done through the application of treatments to one liter experimental units, prepared with distilled water and contaminated water, where a concentration of the nutrients originating from 75 g of phosphoric rock, 100 g of dolomite was added to an aqueous medium at three ranges of pH and three different periods of exposition, to the final treatment. The remaining phosphate concentration was determined for each sample. The results indicated that the dolomite was capable of removing the phosphorous and in this case, the maximum percentage of removal was 96.5%, and it was obtained during a twenty four hour period, at the maximum pH range, which was 6.5 to 7. The statistical analysis indicated that the percentage of removal of the phosphorous was significantly different for the three pH ranges that were evaluated, and with respect to the phosphorous removal for three periods of exposition, only the value obtained at twenty four hours differed from those obtained at forty eight and seventy two hours.

**Keywords:** eutrophication, dolomite, hardness, solar radiation, phosphorous concentration

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento frecuente y progresivo de algas en fuentes de aguas superficiales, es un fenómeno que se observa a menudo a nivel mundial, donde la apariencia verdosa cual manto que cubre los cuerpos de agua, indican una alta concentración de nutrientes que imparte la dinámica en el proceso de fagocitosis realizados por algas y microalgas presentes y que, favorecidos por la presencia de microorganismos, la luz solar y otros factores ambientales se reproducen abundantemente copando toda la superficie y profundidad del cuerpo de agua, alterando las condiciones de vida de otros organismos que habitan ese sistema acuático ya que al cumplir su ciclo de vida, su descomposición, implica una alta demanda de oxígeno disuelto, generando hipoxia y la muerte de organismos acuáticos sensibles a la baja concentración de oxígeno. Las consecuencias de este fenómeno por ende afectan la disponibilidad del recurso hídrico, donde en la mayoría de los casos el motivo principal es el deficiente tratamiento de efluentes o la falta de éste, para reducir el fósforo y el nitrógeno y sus complejos formados, que son vertidos a los cuerpos de agua fuera de los límites máximos permisibles.

La eutrofización se ha convertido en el principal problema de calidad del agua para la mayoría de los ecosistemas marinos costeros y de agua dulce del mundo. Se considera la eutrofización uno de los ejemplos más visibles de alteración de la biosfera debido a las actividades humanas que afectan a los ecosistemas acuáticos a nivel mundial. Debido a la presencia frecuente de este fenómeno, muchos ecosistemas eutróficos enfrentan dificultades para alcanzar el agua los criterios de calidad; la eliminación de fosfatos y/o el amonio gana gran importancia para el tratamiento del agua (Zamparas y Kyriakopoulos, 2021).

La eutrofización va deteriorando la calidad del agua de fuentes naturales, añadiendo mayores cantidades de nutrientes como nitrógeno, fósforo y materia orgánica; lo cual enriquece en nutrientes a los sistemas acuáticos, pero limita el oxígeno (Moreno et al., 2010)

La presencia de altos niveles de eutrofización en las fuentes naturales es un tema de preocupación ambiental y social debido a que afecta la vida acuática de algunos organismos y limita el recurso hídrico para su aprovechamiento, por ello se requiere de una propuesta de tecnología que trate las aguas eutrofizadas de una manera eficiente y económica.

La dolomita es un material que presenta por su composición en sales de carbonato de calcio y magnesio que podría reaccionar con el fosforo o los fosfatos del agua, en proceso de eutrofización, los cuales son el reactivo limitante en este proceso (Basilio, 2015). El fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales en forma de fosfatos y fósforo orgánico; se

considera que el fósforo es el principal elemento limitante del crecimiento de las plantas en las aguas dulces de las zonas templadas y por ello es el principal indicador del grado de eutrofización de un agua; a mayor concentración de fósforo, mayor eutrofización (APHA, 1998).

Sobre lo indicado se plantea lo siguiente: ¿Cuánto es el porcentaje de reducción de los niveles de eutrofización mediante el uso de dolomita a nivel de laboratorio?

Para lo cual se plantea la siguiente hipótesis: Los niveles de eutrofización se reducen en un 50% mediante el uso de dolomita a nivel de laboratorio. Por todo lo planteado se establecieron los siguientes objetivos:

### **1.1. Objetivos**

#### **Objetivo General:**

Evaluar la reducción de los niveles de eutrofización mediante el uso de dolomita a nivel laboratorio.

#### **Objetivos específicos**

Determinar el desarrollo de la eutrofización del medio acuoso por la variación de la concentración de nutrientes a nivel de laboratorio.

Determinar la activación iónica de la dolomita en el medio acuoso por influencia del pH del agua y diferentes periodos de tiempo a nivel de laboratorio.

Determinar el nivel de eutrofización del agua por variación del pH y el periodo de exposición solar y presencia de dolomita a nivel de laboratorio.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

Alvarado et al. (2020), investigaron la remediación de sedimentos contaminados con nitrógeno y fósforo, en forma de  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , para dicho fin estos investigadores realizaron tratamientos con dolomita y zeolita, ambos materiales calcinados. En su investigación mencionan que la finalidad es interrumpir la liberación de nutrientes, para lo cual se realizaron experimentos de incubación en laboratorio para monitorear la liberación de  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , T-N,  $\text{PO}_4\text{-P}$  y T-P del sedimento y se evaluaron el pH, la conductividad eléctrica, el potencial de oxidación-reducción y el oxígeno disuelto en el agua suprayacente durante 60 días. El sedimento modificado con dolomita tuvo un pH y una conductividad eléctrica elevados. La protección con zeolita y dolomita interrumpió efectivamente la liberación de N y P, respectivamente; aquí se descubrió que tapar era más efectivo que mezclar. La mezcla de dolomita y zeolita también resultó eficaz; sin embargo, su eficiencia se vio influenciada por su ubicación y los resultados obtenidos fueron con altos porcentajes de eficiencia de manera que la remoción de nitrógeno alcanzó entre 95.9%; 101.6% y el fósforo 100.2%, estas eficiencias fueron alcanzadas cuando la dolomita se colocó encima del lecho de zeolita.

Según Bankowska et al. (2020) en su investigación para evaluar la capacidad de la piedra caliza para inactivación de fósforo, en muestras de sedimentos de lagos, encontraron que es posible reducir el fósforo reactivo, utilizando una caliza natural molida en condiciones anóxicas. El carbonato de calcio precipitado aplicado al sedimento durante la suspensión controlada redujo la liberación de fósforo reactivo soluble como ortofosfato en un 95% en condiciones anóxicas y un 78% en condiciones de incubación anóxica en dosis media ( $0,75 \text{ kg m}^{-2}$ ) y la suprimió completamente en dosis altas ( $1,5 \text{ kg m}^{-2}$ ) durante al menos al menos 3 meses, independientemente de las condiciones de incubación. La reducción máxima lograda de la liberación de fósforo reactivo soluble como ortofosfato, usando carbonato de calcio precipitado también fue significativa: 78% en condiciones anóxicas y 56% en condiciones anóxicas, pero esto requirió dosis muy altas de este material ( $6 \text{ kg m}^{-2}$ ). Los mecanismos de inactivación de fósforo reactivo soluble como ortofosfato por calcitas fueron: la adsorción de fósforo reactivo soluble durante la aplicación en el sedimento suspendido y la precipitación de compuestos de fosfato de calcio ( $\text{Ca-PO}_4$ ) durante la incubación posterior, lo que se reflejó en un aumento

sustancial de la concentración de HCl- Fracción P (fósforo extraíble en HCl 0,5 M) en sedimentos enriquecidos con calcita, independientemente de la presencia de oxígeno.

Ayoub et al. (2019) evaluaron la eliminación eficiente de fosfato del agua contaminada con polvo de dolomita. En la investigación la dolomita en polvo y el tamaño de partícula fue el parámetro más eficiente en los fines perseguidos, debido al desarrollo de una mejor adsorción para la eliminación de fosfatos en condiciones óptimas de operación. El trabajo experimental se llevó a cabo pasando tres tipos de agua afluyente y dos tipos de aguas residuales alimentadas con una sal de fosfato ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) a través de un lecho de columna fluidizada de polvo de dolomita, donde se evaluó el efecto de varios parámetros, incluido el modo de operación del sistema, el tamaño de las partículas adsorbentes y la velocidad. Se evaluó el flujo a través del lecho (tiempo de contacto), la concentración inicial de fosfato, el pH del afluyente y la presencia de solutos aniónicos competidores en la adsorción de fosfato. Los resultados afirmaron que el modo de operación más eficaz para el sistema era la configuración de lecho fluidizado. Los resultados mostraron además que el polvo de dolomita de menor tamaño ( $<0,074$  mm) mantiene una mejor adsorción. Además, un mayor tiempo de contacto y una menor concentración de fosfato de alimentación dan como resultado una mayor adsorción. Se encontró que la capacidad de adsorción disminuye con el aumento de los valores de pH del afluyente. Se observó que se producía una adsorción competitiva con los aniones existentes, lo que llevaba a una reducción de la eficiencia en la eliminación de fosfatos.

Huh et al. (2017) Realizaron una investigación que consistió en controlar la floración de algas en aguas eutrofizadas por efecto de la aplicación de dolomita porosa, estos investigadores determinaron que los polvos y gránulos de porosidad de cal, poseen una capacidad de remoción promedio de 48.3% de nitrógeno total y también que dicha eficiencia es directamente proporcional al incremento de la porosidad de los gránulos. Se utilizó y evaluó el polvo de horno de dolomita ligeramente quemado como coagulante alternativo porque contiene altos niveles de minerales saludables calcio y magnesio. Se incorporó un agente formador de poros orgánico, para preparar gránulos porosos el cual fue después eliminado mediante un proceso de descomposición térmica. Se utilizó un método de secado por aspersion para producir gránulos esféricos uniformes y reproducibles con baja densidad, ya que las partículas finas de dolomita tienen un comportamiento de aglomeración irregular en la reacción de hidratación. El uso de polvo fino de dolomita y gránulos de diferente porosidad provocó un cambio de color visible en las algas crudas que contienen agua, desde el verde oscuro hasta la incoloridad transparente.

Nam et al. (2017) experimentaron el efecto de la adición de concha de ostra de desecho calcinada, en aguas con algas y contenido de fósforo. El proceso desarrollado en esta investigación fue la floculación en un medio alcalino, para lo cual se probaron diversas dosis en forma de lodo de concha de ostra calcinada en la solución de algas y removió aproximadamente el total de fósforo; además y reguló el pH, disminuyéndolo, considerando que es buena alternativa económica y ambiental para tratar las floraciones de algas. En este estudio, se utilizó una concha de ostra de desecho que contiene calcio, como sustancia respetuosa con el medio ambiente, para tratar el fósforo, una sustancia eutrófica, y para eliminar las algas del agua dulce al mismo tiempo. El análisis de fluorescencia de rayos X mostró que el  $\text{CaO}_2$  era una fase importante en la concha de una ostra cruda, que desempeñaba un papel importante en la floculación del fósforo y de las algas. Para eliminar eficazmente las algas o el fósforo, se calcinaron conchas de ostra a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  y se hidrataron en agua. En este experimento se utilizó la suspensión de concha de ostra calcinada hidratada, de  $5\text{ g/L}$  a  $12,5\text{ g/L}$ , donde los resultados experimentales se compararon con los de la dolomita. Una serie de investigaciones experimentales, mostraron cambios de pH y turbidez utilizando el analizador de calidad del agua y espectroscopia UV-Visible (UV-Vis), demostrando que las algas se eliminaban eficientemente.

Lucas y Romero (2015) investigaron la capacidad de la dolomita para remover arsénico en agua potable en Jauja Metropolitana, debido a que éste sobre pasa la concentración permitida, su investigación fue planteada para manipular el pH adecuado de remoción y el tamaño de partícula de la dolomita. La muestra de agua fue tomada en el tanque de agua potable de la ciudad de Jauja, respetando el protocolo de muestreo de agua, y se trabajaron acondicionando 3 valores pH de agua utilizando NaOH y HCl, la dolomita fue obtenida en una empresa de venta de material calcáreo, la dolomita, fue acondicionada, tamizándola a tres tamaños de partícula y los tratamientos aplicados consistieron en la adición de dolomita en matraces Erlenmeyer por un tiempo de contacto de 8 horas con agitación de 220 rpm y posteriormente, una agitación con 1400 rpm por 30 minutos, continuando con la filtración y análisis de la muestra. Según los experimentos realizados a un pH 7 y un tamaño de partícula de dolomita 38 micrones, se logró remover el máximo porcentaje de arsénico que fue 99,83%, procedente de una muestra de agua de manantial; lo cual significó la reducción del elemento de  $0,0543\text{ mg/L}$  a  $0,000093\text{ mg/L}$ .

Según Basilio (2015) la dolomita tiene la capacidad de adsorber plomo divalente en solución acuosa. Esta investigación fue realizada utilizando un tanque de alimentación de 20

litros de volumen, un sistema de columnas cargadas con dolomita triturada a escala de laboratorio, sobre la que se hizo pasar soluciones acuosas con 50 ppm de plomo divalente, acondicionadas a cuatro rangos de pH, el tiempo de tratamiento fue de 96 horas. Este investigador determinó que el efecto más favorable para la óptima remoción de  $Pb^{+2}$ , se logró con una adsorción en un rango de pH que fluctúa entre 1,5 a 3,5.

## 2.2. Definición de eutrofización

Es el enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes disponibles para las plantas; aunque tanto el nitrógeno como el fósforo contribuyen a la eutrofización, la clasificación del estado trófico normalmente se basa en el nutriente que representa una limitación (Moreno et al., 2010).



**Figura 1.** La eutrofización y los factores que la producen (Fernández, 2022).

## 2.3. Causas de la eutrofización

Una de las más antiguas causas es la descarga de aguas residuales, las cuales son ricas en nutrientes, contribuyendo al cambio trófico del cuerpo de agua receptor. El uso excesivo de fertilizantes, que genera una contaminación del agua fundamentalmente mediante el aporte de nitrógeno (en forma de sales de nitrato y amonio) y fósforo (como fosfato). La deforestación y la erosión en suelos agrícolas influyen en la carga de nutrientes, ya que los escurrimientos al pasar por una tierra que no tiene protección, “lavan” la capa fértil, llevándose

consigo los nutrientes. La presencia de gases ambientales tales como óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), al entrar en contacto con el agua atmosférica forman ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), que forman sales solubles al alcanzar el suelo con los cationes de este, generando un empobrecimiento de dichos iones. Dichas sales son volcadas fácilmente en los cuerpos de agua, dando lugar a un proceso de eutrofización (Moreno et al., 2010).

#### **2.4. Efectos de la eutrofización**

En los ecosistemas acuáticos eutrofizados, se comienza a dar una alteración de la biota y de la diversidad biológica, provocando una proliferación de algas, cianobacterias y macrófitos en demasía. El desarrollo de estos organismos provoca opacidad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua. Las consecuencias directas son la imposibilidad de llevar a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos de la columna de agua y por lo tanto, disminución en la producción de oxígeno libre; simultáneamente aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los organismos descomponedores, que empiezan a recibir excedentes de materia orgánica generados en la superficie. El fondo del ecosistema acuático se va convirtiendo de forma gradual en un ambiente anaerobio, y el consecuente aumento en la concentración de gases como anhídrido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), haciendo poco factible la vida de la mayoría de las especies que forman dicho ecosistema. Se da por tanto mortandad masiva de biota en general, bioacumulación de sustancias tóxicas, aumentando la sedimentación en los cuerpos de agua, reduciendo la vida útil, proliferando la aparición de organismos patógenos y vectores de enfermedad (Moreno et al., 2010).



**Figura 2.** Apariencia del agua superficial eutrofizada ( Fernández, 2022).

### **2.5. Usos de la dolomita**

En las recientes investigaciones se han estudiado las características fisicoquímicas y de adsorción de la dolomita natural se determinó para evaluar su potencial para la eliminación de As (III) de soluciones acuosas (Shah et al., 2019).

En estudios anteriores, se demostró que la dolomita constituía un adsorbente eficiente de fosfatos de soluciones acuosas. Una vez que se logra la saturación del adsorbente, se vuelve inútil para usos posteriores, generando residuos, un nuevo problema ambiental si no se puede eliminar adecuadamente. Es importante estudiar el proceso de desorción de fosfatos para la recuperación y reutilización de dolomita (Piol et al., 2019).

En esta investigación, se utilizó dolomita calcinada a 650 °C, 750 °C o 950 °C y MgO comercial como precipitantes en la eliminación simultánea de fosfato y amonio de una solución sintética  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  y lodos agrícolas. La calcinación a 750 °C fue la opción preferida ya que la dolomita se descomponía en MgO y  $\text{CaCO}_3$  para una precipitación óptima de estruvita (Pesonen et al., 2019).

Los minerales de dolomita se utilizan comúnmente para la filtración y procesamiento de agua potable: para aumentar el valor del pH del agua purificada después de un sistema de ósmosis inversa. Mientras el agua se cuela de arriba a abajo en el filtro, el mineral de dolomita se disuelve y proporciona minerales naturales al agua como calcio, magnesio y carbonato (Hatenboerwater, 2024).

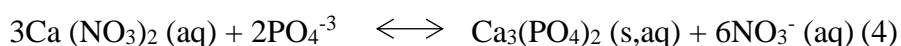
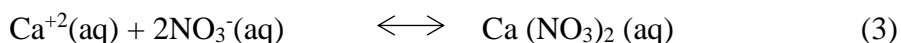
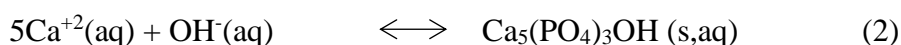
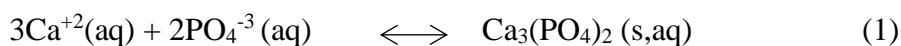


**Figura 3.** Dolomita natural

## 2.6. Reacción química de la dolomita con el nitrógeno y fósforo

El amonio y el fosfato pueden precipitarse simultáneamente como un mineral de fosfato, la estruvita ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), que podría usarse como fertilizante de liberación lenta, reduciendo el suministro de nutrientes a los cursos de agua y disminuyendo las pérdidas de amonio en forma de gas amoníaco. Los precipitantes típicos para la precipitación de estruvita son  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (Pesonen et al., 2019).

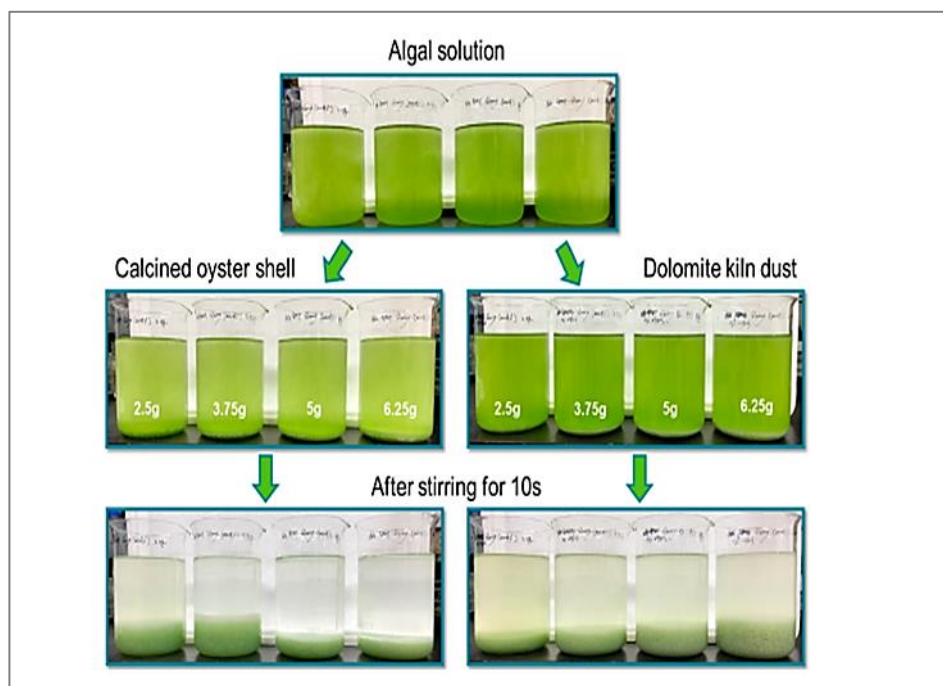
Para la eliminación de algas, las fuentes de cationes desempeñan papeles importantes para la precipitación por la cristalización formada por el enlace iónico con un ión fosfato que contribuye a la eutrofización, así como a la coagulación por la reacción química en la superficie de las algas, mostradas en las reacciones (1) y (2). En las posibles reacciones del calcio divalente liberado, su reacción con el nitrato, tiene otras alternativas de reacción, que se describen en las reacciones (3) y (4), observándose que no reacciona el calcio con el nitrato en sus diferentes formas, sin embargo, si reacciona con el ion hidroxilo (NAM et al., 2017).



## 2.7. Importancia de la dolomita en el tratamiento de aguas contaminadas

La dolomita es una mineral cuya importancia, no solo radica en su uso en actividades agrícolas, si no también, en un material para el tratamiento de agua, tal como se reportan en investigaciones de hace más de una década. En el ámbito del tratamiento de aguas, su aplicación más frecuente ha sido en la remoción de metales pesados presentes en relaves mineros, sin embargo, presenta otras propiedades tales como amortiguador de pH, propiedades como precipitante y en agua de consumo se ha utilizado como un mineral mineralizador.

El proceso de adsorción para la eliminación de  $Pb^{2+}$  en una muestra de agua utilizando dolomita cruda y calcinada (a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), es reportado como resultado de una investigación, en dicho proceso la dolomita mostró una buena capacidad de adsorción de iones metálicos del agua. El uso de dolomita en polvo, donde se ajuste el pH, las duraciones de retención y las velocidades de agitación, permite conocer las propiedades de sorción de dolomita modificada y no modificada. En diversos entornos operativos, también se investigaron mejoras en la calidad del agua en términos de turbidez y alteraciones del pH. La dolomita calcinada tiene una capacidad general de sorción mayor en comparación con la dolomita cruda en todas las diferentes condiciones operativas, con eficiencias de eliminación del 99,95% a pH 7–9, tiempo de retención después de 30 minutos y sin velocidad de agitación (0 rpm) (Jamil et al., 2023).



**Figura 4.** Eficiencia de eliminación de diversos nutrientes con dolomita ( Huh et al., 2017).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

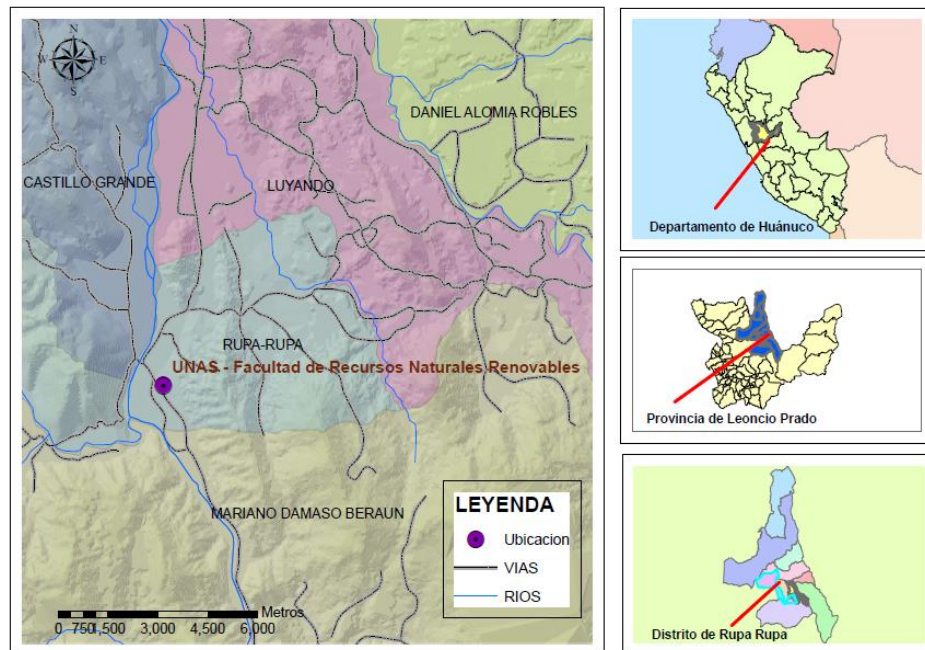
#### **3.1. Lugar de ejecución**

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), ubicado en las coordenadas UTM: 390256 Este y 8970849 Norte a una altitud de 662 m.s.n.m en la ciudad de Tingo María.

Políticamente la institución mencionada se encuentra en el distrito Rupa Rupa de la provincia de Leoncio Prado en la región Huánuco, mientras que, al considerar la posición geográfica, dicho laboratorio se ubica en las coordenadas UTM: Este: 390312 y Norte: 8970772.

Las condiciones climáticas de la zona son: temperatura máxima de 30.5°C, la mínima de 20,3°C, y un promedio de 24,3°C; la precipitación acumulada mensual es 235 mm, la humedad relativa es 87,0% y la altitud sobre el nivel del mar es 660 m (Senamhi, 2023), considerando los tipos de zonas de vida, la ciudad de Tingo María viene a ser la capital del distrito Rupa Rupa y se ubica en la formación vegetal de bosque muy húmedo Pre montano Tropical (bmh - PT), de acuerdo con las regiones naturales del Perú corresponde a la selva alta o Rupa Rupa (Pulgar Vidal , 2014)

En términos de ecología, según la clasificación de áreas importantes o composición vegetal de organismos y mapa biológico. Tingo María fue encontrado en el muy húmedo premontano tropical de formación vegetal bmh-PT. Según el área natural del Perú, corresponde a Rupa Rupa o Selva Alta (Bragg y Mendiola, 2000).



**Figura 5.** Ubicación Geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

### 3.2. Materiales, equipos de laboratorio y reactivos

#### 3.2.1. Materiales y equipos

Vasos precipitados marca Pyrex de 50, 100 y 500 mL; matraces de Erlenmeyer marca Pyrex de 25 y 50 mL; Cubas de vidrio, pipetas graduadas de 5 y 10 mL; fioles marca Pyrex de 10, 25, 50 mL; frascos ámbar de 100 mL; tubos para centrifuga eppendorf; placas petri; papel filtro Whatman N° 40; mortero y pilón; recipientes; espátulas y envases de plástico. Termómetro digital, Peachímetro marca WMETERS, Multiparámetro marca HANNA modela HI9813, Test kit fosfato  $PO_4^{3-}$  (0 – 5 mg/l) marca HANNA/HI 3833, Test Kit de Dureza marca HANNA modelo HI3812, Estufa marca MMM Group, modelo EC 222 ECO, Alemania; balanza analítica marca RADWAG modelo AS 220.R2.

#### 3.2.2. Reactivos

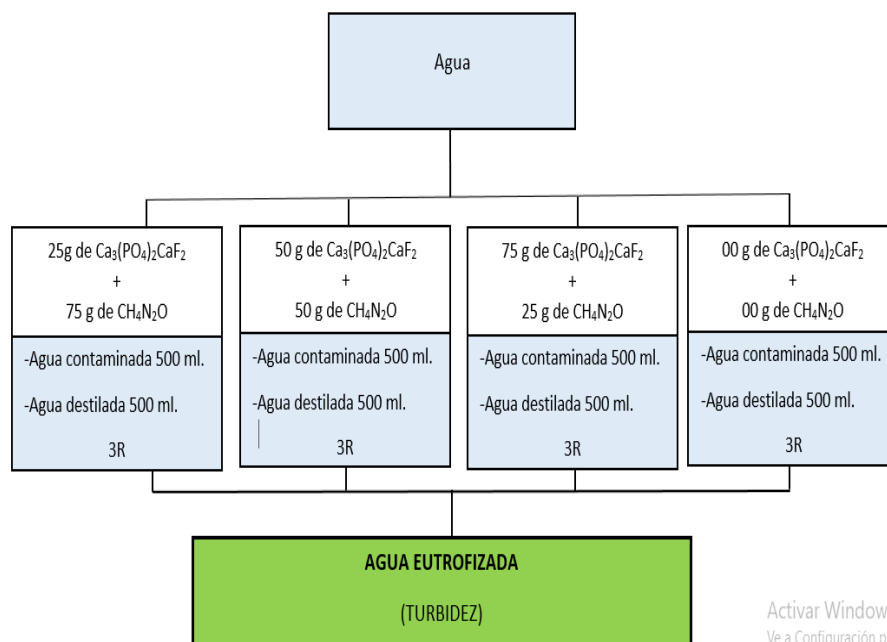
Ácido etilen-diamino- tetraacético (EDTA), Oxalato sódico, Cloruro de amonio, Negro de eriocromo T, Hidróxido sódico 0.1M, Ácido clorhídrico 0.1 M, Amonio concentrado, Rojo de metilo, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico.

### 3.3. Metodología

#### 3.3.1. Determinación del desarrollo de la eutrofización del medio acuoso por la variación de la concentración de nutrientes a nivel de laboratorio.

La generación del proceso de eutrofización en el agua se trabajó con agua destilada y agua de mesa en bidón, utilizando cubas de vidrio mínimo de 1 L, donde se mezcló agua pura con agua contaminada, al 50% en volumen. El agua contaminada fue colectada en una fuente local, con vertimientos de efluentes domésticos con carga orgánica, la cual se filtró y se determinó, su pH, temperatura y OD. Se procedió a establecer la cantidad de roca fosfórica y urea óptima en la que el agua se eutrofice más rápido adicionando a las cubas de vidrio las siguientes dosis 25 g, 50 g y 75g de roca fosfórica completando a 100 g con urea respectivamente y se consideró un testigo, cada tratamiento con sus tres repeticiones y se sometió a exposición de la luz solar, por 24 horas efectivas. Finalmente se evaluó y se seleccionaron los parámetros de la cuba con mayor intensidad de eutrofización para la parte experimental (Badamasi et al., 2019).

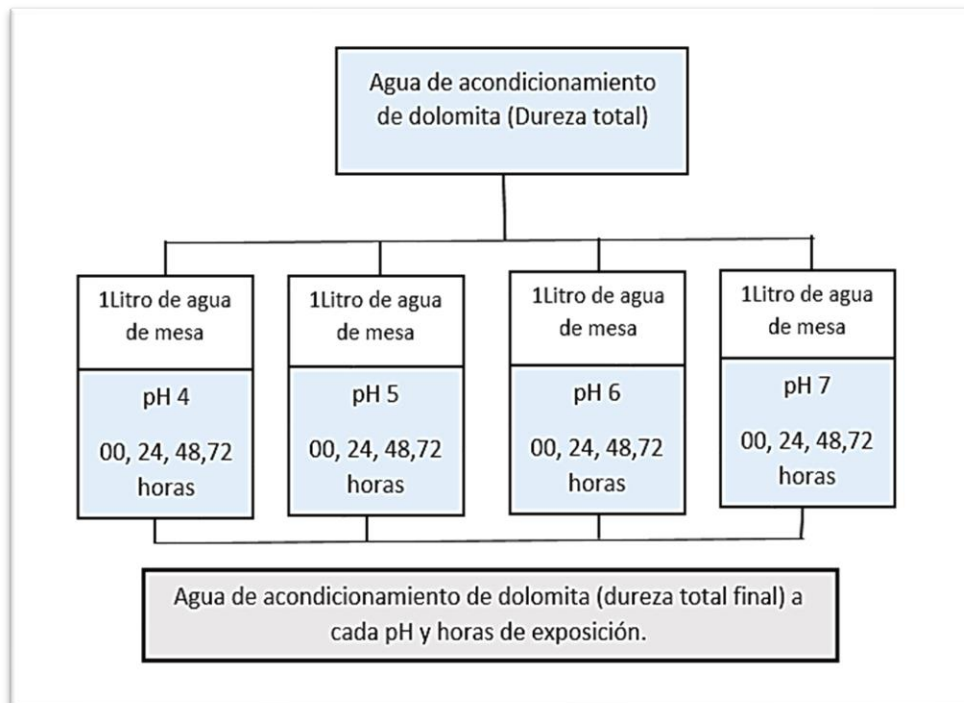
La medición del pH de la muestra se realizó de acuerdo con el método Estándar Methods for the Examination of Water and Wastewater parte 4500-H+ -B (APHA, 2005). La lectura del pH se realizó con el pH-metro marca WMeters y la lectura de turbiedad se realizó con un turbidímetro portátil marca HANNA HI93703C.



**Figura 6.** Proceso de generación de agua eutrofizada de la investigación.

### 3.3.2. Determinación de la activación iónica de la dolomita en el medio acuoso por influencia del pH y tiempo de contacto del agua a nivel de laboratorio.

Se procedió a determinar el pH y tiempo de contacto óptimo para la dolomita en el medio acuoso. Utilizando 1 L agua de mesa, vertido en las cubas de vidrio en los 3 rangos de pH con sus tres repeticiones y se incorporaron 100 g de dolomita y se sometieron a 3 tiempos de contacto de 24, 48 y 72 horas, y tres rangos de pH 4, 5,6 y 7. Finalmente se realizó un análisis de dureza total a todas las muestras y se seleccionó la de mayor dureza, para trabajar con el tiempo de contacto y el pH en la próxima etapa experimental (Pokrovosky et al., 2009).



**Figura 7.** Procedimiento experimental para el acondicionamiento de la dolomita.

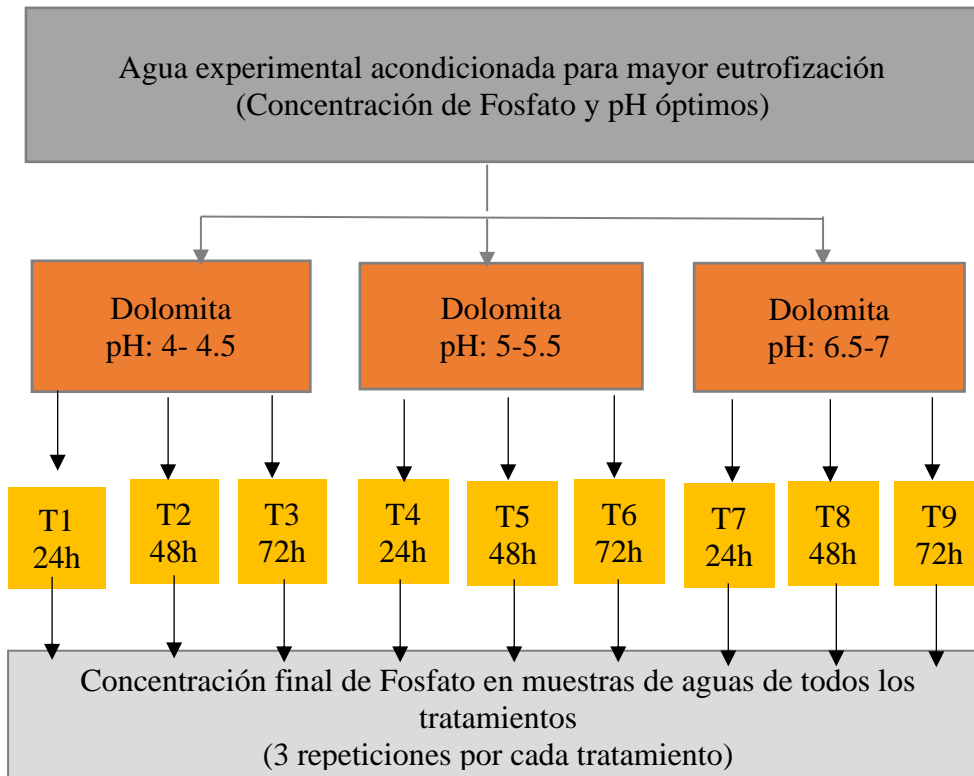
La dureza total, se calculó por el método de la prueba de Hanna que consiste en: Sacar 5 ml de la muestra, luego se añadir 5 gotas de la solución buffer que ajustó la solución a un pH de 10 para luego agitarlo. Se añadió cinco gotas del indicador calmagite y se agitó hasta que se tornó de color rojo violeta. El gasto se multiplicó por 300 para conocer la cantidad de carbonato de calcio en mg/L presente en la muestra (APHA, 2005).

### **3.3.3. Determinación del nivel de eutrofización del agua por variación del pH y el periodo de exposición solar y presencia de dolomita a nivel de laboratorio.**

Con los resultados óptimos del agua eutrofizada y del agua acondicionada con dolomita, obtenidos en la primera y segunda parte del procedimiento, se determinó el efecto del tratamiento sobre eutrofización, considerando lo siguiente: Se acondicionaron unidades muestrales de 1 litro de agua de mesa ajustada al pH óptimo, se adicionó la dolomita después de transcurrido el tiempo óptimo determinado, posteriormente se adicionó 500 ml de agua residual en las mismas condiciones del primer punto de la metodología, acerca del desarrollo de la eutrofización del medio acuoso y se sometió a exposición solar según el tiempo óptimo. Finalmente se colectó una muestra de cada tratamiento y se le realizó un análisis de fosfato.

#### **a) Determinación de fósforo total**

Para determinar el fósforo total se utilizó el equipo de prueba de fosfato de Hanna HI 3833. Se procedió a retirar la tapa del vaso de plástico, se enjuagó el vaso con la muestra de agua, luego se llenó con muestra de agua el vaso hasta la marca (10 ml). Se añadió un paquete de reactivo HI 3833-0. Se colocó la tapa y se mezcló la solución hasta que los sólidos se disolvieron. Se retiró la tapa y se transfirió la solución al cubo comparador de color. Se dejó reposar por un minuto. Se procedió a leer observando bien al color que se ajusta mejor la solución en el vaso y se anotaron los resultados. Para ajustar a fósforo se usó la siguiente conversión de la siguiente relación: 95 g de fosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) aporta 31 g de fósforo (P). Las muestras para lectura de fosfato fueron diluidas con factor de dilución de 1/10000.



**Figura 8.** Diseño de la investigación

### 3.4. Criterios de estudio

#### a) Nivel de investigación

La presente investigación tiene un nivel explicativo, ya que se utilizó la recolección de datos de las variables en estudio, para probar una hipótesis con base en la medición numérica (Hernández et al., 2010).

#### b) Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicativo, Hernández et al. (2010) afirma que en este tipo de estudio busca la aplicación de los conocimientos adquiridos a la vez que se adquieren otros.

#### c) Método de investigación

El método de investigación fue inductivo y analítico, el primer método utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos aceptados como válidos, mientras que con el método analítico se estudió y conocieron los resultados obtenidos.

#### d) Diseño de investigación

Considerando la manipulación de las variables independientes, el diseño fue experimental y factorial  $3^2$ , es decir dos factores y tres niveles (Hernández et al., 2014).

**Tabla 1.** Variables de investigación

Tipos de variable	Descripción de la variable	Dimensiones	Indicadores
Independientes	El uso de la dolomita	1. El rango de pH del agua contaminada en presencia de la dolomita	Valores de rangos de pH ajustados: 4.0 - 4.5; 5.0 -5.5; 6.5 - 7.0.
		2. El período de exposición a la luz del agua contaminada en presencia de dolomita.	En número de horas de exposición a la luz solar: 24 horas, 48 horas y 72 horas.
Dependiente	La reducción del nivel de eutrofización del agua contaminada.	Apariencia de la muestra de agua impartida presencia o ausencia de algas.	Variación de la concentración de fosfatos en el agua contaminada.

**Tabla 2.** Niveles para los factores de la investigación

Factores	Nivel (1)	Nivel (2)	Nivel (3)
A	A1	A2	A3
B	B1	B2	B3

Donde:

A: El rango de pH del agua contaminada en presencia de la dolomita, A1:4.0-4.5; A2: 5.0-5.5; A3: 6.5- 7.0

B: El período de exposición a la luz del agua contaminada en presencia de dolomita; B1: 24 horas; B2: 48 horas; B3: 72 horas.

**Tabla 3.** Matriz de diseño de la investigación

N°	A	B	Nivel de eutrofización (unidades)
	(Unidades de pH)	(Tiempo de exposición)	
1	-1	0	-
2	-1	-1	-
3	-1	+1	-
4	0	0	-
5	0	+1	-
6	0	-1	-
7	+1	0	-
8	-1	-1	-
9	+1	+1	-

A cada tratamiento se le realizó tres repeticiones.

Donde:

A: El rango de pH del agua contaminada en presencia de la dolomita.

B: El período de exposición a la luz del agua contaminada en presencia de dolomita.

### 3.4.1. Análisis estadístico

Se utilizó el programa InfoStat versión libre para el procesamiento de los datos experimentales obtenidos de los tratamientos aplicado se realizó un análisis de varianza y una prueba de Tukey para establecer si existe diferencia significativa entre los tratamientos.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Determinación del desarrollo de la eutrofización del medio acuoso por la variación de la concentración de nutrientes a nivel de laboratorio.

El agua utilizada en la investigación, tiene una considerable contaminación por descomposición de materia orgánica, tanto carbonosa como nitrogenada, esto se puede inferir por el valor de oxígeno disuelto, el cual es un valor típico de un agua contaminada y por otro lado está el valor de pH, que se ubica a la derecha de la escala de medición es decir alcalina, usualmente se debe a la presencia de compuestos amoniacales que elevan el pH, cuando aparecen producto de la descomposición de la materia orgánica, en su trabajo de investigación reportó valores de pH entre 6.90 a 8.32 para aguas residuales (Camacho-ballesteros et al., 2020)

**Tabla 4.** Caracterización fisicoquímica básica del agua contaminada de la investigación.

Parámetro	Valor promedio	Unidad de medida
Temperatura	23.36	°C
pH	8.0	---
Oxígeno Disuelto	4.74	mg/L

Cualquier actividad que utiliza agua en su funcionamiento puede aumentar la materia orgánica total en las aguas residuales. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos que consiste en proteínas, azúcares, carboxílicos, ácidos, ácidos nucleicos y sustancias húmicas acuáticas. La alta concentración de materia orgánica en aguas residuales se debe a la acumulación de materia orgánica procedente de las heces, restos de alimento, metabolismo del organismo y alimento no consumido. Puede afectar indirectamente a los organismos, pero puede reducir los niveles de oxígeno disuelto en las aguas residuales. La disminución del nivel de oxígeno disuelto en el agua se debe a los descomponedores que necesitan más oxígeno para descomponer el material orgánico (Arfiati et al., 2021).

Durante la hidrólisis, los compuestos orgánicos como proteínas, carbohidratos y lípidos se descomponen en aminoácidos, ácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga. La materia orgánica durante algún tiempo será descompuesta por los microbios y parte del carbono C de los microbios se oxidarán a CO<sub>2</sub>, el que contribuye del 3% al 30% en la descomposición de la

materia orgánica mientras que los aminoácidos representan del 2% al 15%. Las condiciones de pH que oscilan entre 6 y 8 se consideran óptimas para que los descomponedores degraden la materia orgánica. Las bacterias pueden funcionar y producir enzimas que se convierten en catalizadores y aceleran reacciones en una condición óptima de pH (Arfiati et al., 2021).

En el análisis de varianza, se demostró estadísticamente con una probabilidad del 5% que los tratamientos producen diferencias en eutrofizar el medio acuoso.

**Tabla 5.** Análisis de variancia para la turbiedad por efecto de la concentración de nutrientes en para la determinación del desarrollo de eutrofización en el medio acuoso.

Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	3	18718.5	6239.5	4537.82	<0.0001
Error	12	16.5	1.38		
CV (%)			3.19		

Es significativo según la prueba de F A 5% de probabilidad.

En la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para la turbidez, se mostraron que los tratamientos T0 (testigo) y T1 (25 g de roca fosfórica) presentaron valores bajos de turbidez, de 4.3 y 17.3 respectivamente, y se registró valores más altos de dureza en los tratamientos T2 (50 g de roca fosfórica) y T3 (75 g de roca fosfórica).

Por otra parte, el tratamiento T3 registró el valor más alto (93.5).

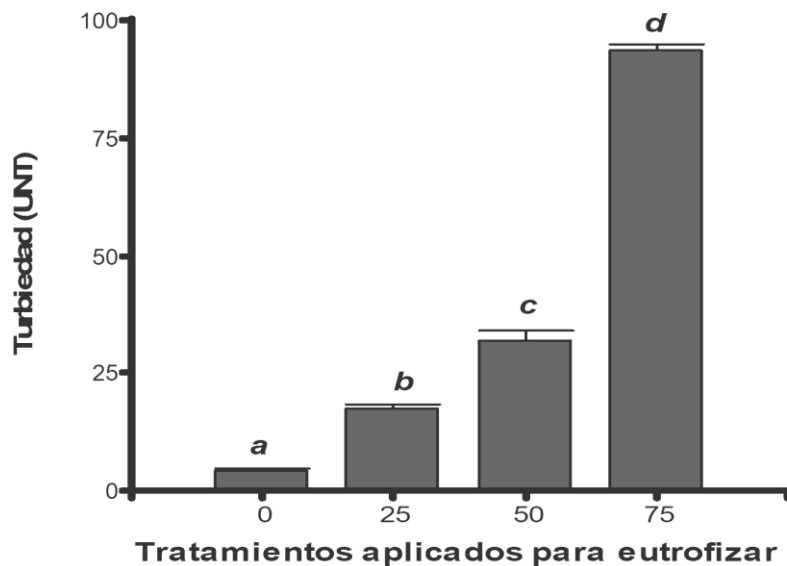
**Tabla 6.** Determinación de la variación de la apariencia del agua por valor de turbidez, a diferentes dosis de roca fosfórica en un periodo de 24 horas.

Tratamiento	Turbiedad (UNT)	
(T0) Testigo	4.3	a
(T1) 25 g roca fosfórica	17.3	b
(T2) 50 g roca fosfórica	32.0	c
(T3) 75 g roca fosfórica	93.5	d
Promedio	36.8	

Letras diferentes en la tabla presentan diferencia estadística significativa en la prueba de Tukey al 5% de probabilidad.

Se observa que el mayor promedio de turbidez fue en T3 (75 g de roca fosfórica), para medir su efecto en la aparición de algas y microalgas, en un periodo de 24 horas de exposición a la luz solar, cuantificando su efecto con el valor de turbidez alcanzado. Los resultados nos

permiten inferir que cuando la masa de roca fosfórica adicionada es mayor, incrementa la turbidez impartida debido al crecimiento de microalgas, esto se debe a la presencia e interacción de diversos factores entre ellos el aporte de fósforo en forma de fosfato, la presencia de estos microorganismos procedentes de agua residual utilizada y el impacto de su exposición a la luz solar.



**Figura 9.** Variación de la turbidez del medio acuoso con la aplicación de nutrientes.

Goldsberry et al. (2023) mencionan que la eliminación de nutrientes de las aguas residuales se lleva a cabo a menudo mediante precipitación intencionada de estruvita. La estruvita ( $\text{NH}_4 \text{Mg PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , o fosfato amónico y magnésico) es un mineral que se forma a menudo en las plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente aquellas con digestores anaeróbicos. La fotosíntesis se utiliza en la operación de un reactor rotatorio de biopelícula de algas para mejorar la formación de estruvita aumentando el valor del pH dentro de la biopelícula mediante la absorción de dióxido de carbono de la solución. Las mediciones de pH tendieron a aumentar con la profundidad a través de la biopelícula cuando se expuso a la luz, lo que confirma la función de la fotosíntesis en el aumento del pH y, como consecuencia, la formación de estruvita.

La absorción y el almacenamiento de fósforo son procesos que requieren energía y que, en condiciones autótrofas, requieren suficiente luz para impulsar la fotosíntesis. El cultivo de algas con un nivel bajo de  $\text{CO}_2$  y abundante irradiación ralentiza el crecimiento celular y división, pero aumenta el contenido de polifosfato por peso o volumen celular, lo que sugiere que la adopción de fósforo de flujo continúa bajo limitación de carbono. Al desarrollar sistemas basados en microalgas impulsados la irradiancia solar debe tenerse en cuenta para el secuestro

de fosforo. La irradiación también puede tener diferentes efectos dependiendo de la temperatura de la suspensión ya que la mayor absorción de fosforo a temperaturas óptimas se debe a una tasa elevada de formación de polifosfatos insolubles en ácido (Solovchenko et al., 2016).

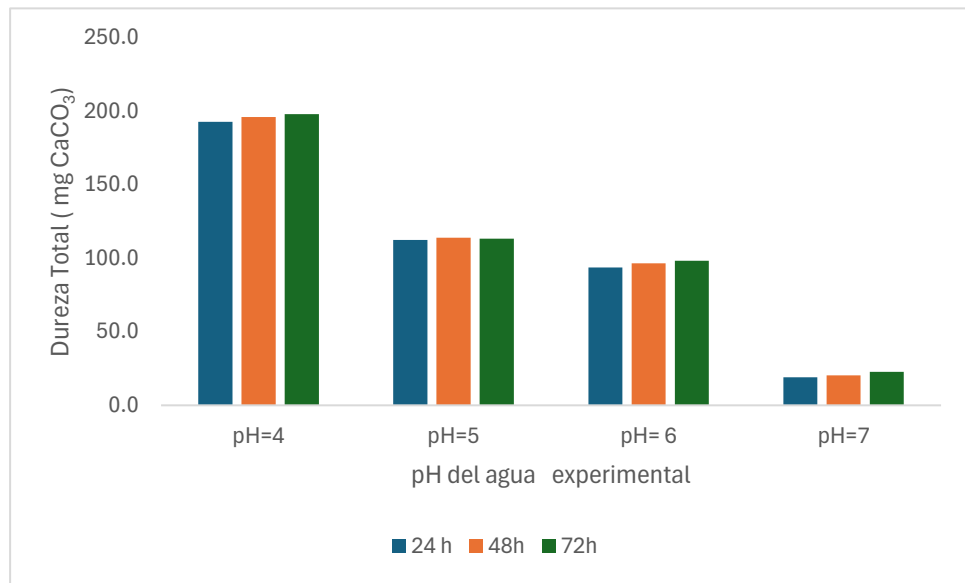
#### 4.2. Determinación de la activación iónica de la dolomita en el medio acuoso por influencia del pH y tiempo de contacto del agua a nivel de laboratorio.

Se observa que cuando el pH del medio acuoso con presencia de dolomita es menor (Tabla 7), la concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se incrementa, y así también que la concentración de carbonato incrementa según el tiempo de contacto, este efecto se debe a la lixiviación de iones carbonatos ante la acidificación del medio, liberando los iones carbonatos, que cambian las características del medio acuoso, lo que denominamos la activación iónica del sistema acuoso, lo cual incrementa la posibilidad de reacción con otras sustancias presentes en el agua, generando un cambio en la calidad, para el caso el agua adquiere mayor dureza a lo largo del tiempo favorecido por el pH.

**Tabla 7.** Dureza total del agua en presencia de dolomita a diferentes valores de pH

Trat.		Tiempo de contacto (Horas)			
		0	24	48	72
T0	pH 7	16.63±1.00 <sup>a</sup>	19.00±1.00 <sup>b</sup>	20.43±1.00 <sup>b</sup>	22.68±1.00 <sup>b</sup>
T1	pH 4	190.13±1.00 <sup>h</sup>	192.73±1.00 <sup>h</sup>	196.00±1.00 <sup>i</sup>	198.13±1.00 <sup>i</sup>
T2	pH 5	110.48±1.00 <sup>f</sup>	112.50±1.00 <sup>g</sup>	113.93±1.00 <sup>g</sup>	115.03±1.15 <sup>g</sup>
T3	pH 6	90.85±1.00 <sup>c</sup>	93.80±1.00 <sup>d</sup>	96.65±1.00 <sup>d</sup>	100.32±0.89 <sup>e</sup>

Los valores representan (promedio ± EE), los datos provienen de la interacción de los dos factores con cuatro repeticiones ( $p \leq 0.05$ ).



**Figura 10.** Variación de la dureza total de agua a diferentes pH y tiempos.

La dureza aumenta con la desacidificación y estabilización del agua. La remineralización se realiza mediante filtración a través de materiales apropiados (mármol, dolomita, dolomita medio quemada, magnesita y otros) o mediante dosificación directa de compuestos de calcio (cal). Dado que la solubilidad de las materias primas utilizadas es baja, se debe aumentar en agregando  $\text{CO}_2$  al agua (Barlokovak et al., 2017).

El agua dura es un tipo de agua que contiene altos niveles de minerales disueltos, particularmente calcio y magnesio. Estos minerales provienen de la corteza terrestre y son transportados a los acuíferos por el agua de lluvia a medida que avanza a través de formaciones rocosas naturales (Feebarani, 2023).

Respecto a la actividad iónica y sus consecuencias, generada por la dureza y el pH, (Da Cunha et al., 2020), consideran que son factores importantes con respecto calidad química y mencionan que la dureza está relacionada con las concentraciones de carbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos de diversos cationes, principalmente calcio y magnesio, que se presentan en la forma de  $\text{CaCO}_3$  (ppm). Por otro lado, el pH es una medida del grado de actividad de los iones de hidrógeno libres ( $\text{H}^+$ ) en la solución. Los cambios en estos parámetros se señalan como responsables de reducir la eficacia de diferentes principios activos, en algunos herbicidas utilizados para el control de malezas. El agua dura (altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) puede actuar sobre algunos herbicidas reemplazando el  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  presentar en sus estructuras por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , cambiando sus propiedades y reduciendo su eficacia. Del mismo modo, los valores

altos de pH pueden contribuir a la degradación temprana del activo principio, o incluso interferir con la absorción del herbicida por tejidos vegetales.

La utilización de carbonatos y dióxido de carbono es una de las técnicas de endurecimiento más populares en la tecnología del agua potable en estos días. Al penetrar agua blanda a través un lecho de piedra caliza a un cierto caudal, los iones de calcio y bicarbonato se introducen gradualmente en el agua a través del proceso de disolución de los granos de calcita en el lecho filtrante. Los procesos alternativos prácticos que se han propuesto para la adición de iones  $Mg^{2+}$  al agua incluyen dosificación química y disolución de minerales de dolomita. La principal ventaja de este proceso es el enriquecimiento del agua con ambos elementos: calcio y magnesio. La dolomita medio calcinada en combinación con dióxido de carbono. Se utiliza como donante de micronutrientes deficientes (Luptáková y Derco, 2015).

#### 4.3. Determinación del nivel de eutrofización del agua por variación del pH y el periodo de exposición solar y presencia de dolomita a nivel de laboratorio.

**Tabla 8.** Remoción de fósforo con dolomita a diferentes valores de pH y tiempos de exposición

Tto.	Conc inicial P(g/L)	Periodo Exp	Dolomita (g)	pH promedio	Fosfato final (ppm)	Conc. Final P (g/L)	%Remoción de P promedio
T1	11.98	24	100	4.2	5	1.49	87.57
T2	11.98	24	100	5.2	3	0.96	91.97
T3	11.98	24	100	6.9	1	0.42	96.50
T4	11.98	48	100	4.2	5	1.69	85.93
T5	11.98	48	100	5.3	5	1.49	87.60
T6	11.98	48	100	6.8	2	0.79	93.43
T7	11.98	72	100	4.3	4	1.44	87.97
T8	11.98	72	100	5.3	4	1.20	90.00
T9	11.98	72	100	6.4	3	0.99	91.70

Se observa que a un pH de 6.9 y un periodo de exposición de 24 horas, se logró mayor remoción de fósforo con un valor de 96.5%, también es importante mencionar que con el incremento del periodo de exposición, no se presentó mayor eficiencia de remoción de fósforo, esto podría deberse a que al producirse un proceso batch, el proceso que se desarrolla para remoción de fósforo, podría ser la adsorción, de manera que después de 24 horas (Tabla 8), la capacidad de adsorción de la dolomita llega a su máximo nivel y los iones de fosfatos dejan de ser adsorbidos permaneciendo en el medio acuoso, con un potencial eutrofizante en el medio.

Jing Li et al. (2019) desarrollaron un nuevo biocarbón modificado a partir de lodos de depuradora urbana y dolomita de acuerdo con una relación de masa seca de lodo a dolomita de 1:1, para eliminar fosfato. Los resultados experimentales mostraron que el proceso de adsorción prefería un pH más bajo, y el biocarbón bajo investigación exhibió una alta eficiencia de eliminación de fosfato del 96,8% con una dosis de adsorbente de 2,6 g/L y un pH de solución inicial de 4,5. el efecto del pH sobre la adsorción de fosfato. Se puede deducir que la eficiencia de eliminación de fosfato disminuye con un aumento del pH, donde la propiedad de la superficie se altera, siendo la transición de especies de fosfato la razón principal de la menor eficiencia de eliminación de fosfato a un pH más alto.

Haddad et al. (2018) mencionan que la tasa de eliminación de fosfato es mucho mayor a un pH más bajo, lo que indica que la adsorción de fosfato depende preferiblemente de la superficie. Interacción en lugar de precipitación. Ciertamente, la precipitación de magnesio y calcio con fosfato también fue una razón importante para la eliminación de fosfato.

Ayoub et al. (2019) afirman que los principales factores que afectan el grado de adsorción de fósforo a un adsorbente incluyen las características químicas del adsorbato y las características intrínsecas del adsorbente, como el tamaño de los poros, la densidad de las partículas, la permeabilidad y el área superficial. Otros factores incluyen el tamaño de las partículas, la temperatura, el pH de la solución, el tiempo de contacto, la concentración inicial de fosfato y la presencia de solutos competidores que reducen los sitios de adsorción disponibles por las sales inorgánicas. Se descubrió que el polvo de dolomita en bruto, obtenido de roca dolomítica triturada, es adsorbente muy eficaz para eliminar bajas concentraciones de fosfatos presentes en diversas matrices de agua y aguas residuales.

Ayoub et al. (2019) afirman que a medida que aumenta el pH la eliminación de fósforo disminuye. Esto puede atribuirse a la pérdida de atracción electrostática hacia los aniones fosfato a medida que aumenta el pH, también lo hacen las cargas negativas que crean una fuerza repulsiva hacia los aniones.

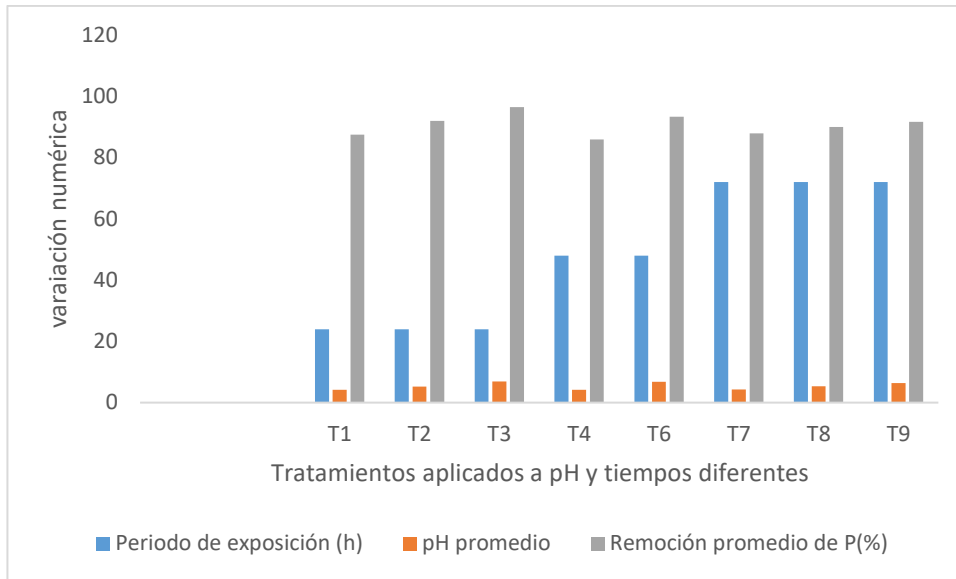
En un experimento realizado utilizando dolomita y calcita en bruto para la eliminación de fosfatos, los resultados sugieren que el proceso de adsorción de fosfato en calcita y dolomita a un pH de 6,0 a 7,0 se puede atribuir principalmente a la precipitación de complejos de fosfato de calcio. También se dedujo que la dolomita ofrece la mayor capacidad de sorción a niveles elevados de pH de  $\geq 8,0$  cuando se preestablecen altas concentraciones de fosfato ( $> 200$  mg/L) (Xu et al., 2014, como se cita en Ayoub et al., 2019).

Según Xing et al. (2017) desarrollo una investigación para conocer la adsorción de fosfatos en el mineral de siderita activada, la cual aumentó con un mayor tiempo de contacto, se informó que el equilibrio de adsorción se alcanzó después de 8 h para la mayoría de los tamaños de partículas, y la capacidad de adsorción se logró después de 24 h para partículas de 0,05 a 0,1 mm. Tamaño.

La dolomita es un adsorbente sólido para eliminación de fosfatos. Es un compuesto mineral de un doble carbonato de calcio (Ca) y magnesio (Mg)  $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ , que puede usarse como sólido adsorbente a bajo costo. Sus propiedades facilitan el proceso de adsorción porque tiene alta cristalinidad, es poroso y de naturaleza alcalina. Al estar compuesto por dos especies de metales alcalinos le confiere la propiedad de poder neutralizar y eliminar fácilmente diferentes tipos de sustancias con acidez fuerte. Aunque las propiedades de la dolomita hacen que la eliminación del fosfato sea más fácil, el proceso de adsorción puede verse limitado por la superficie particular de este material (Jurado-Dávila et al., 2023).

La mayoría de los investigadores creen que la principal razón de la eutrofización de las masas de agua es el aumento del contenido de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo en el agua. Dado que el fósforo en el agua no puede reciclarse completamente, el elemento fósforo se ha convertido en el principal factor contaminante del fenómeno de eutrofización en la masa de agua (Yang, 2022).

También se sabe que la dolomita medio quemada funciona muy bien para eliminar el fósforo contenido en diversos tipos de aguas residuales, generando compuestos de fósforo amorfo. El incremento en la dirección positiva por los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , lo convierte en un coagulante potencial, que puede reaccionar con los coloides de algas aniónicos (Jae-Hoon Huh et al., 2017).

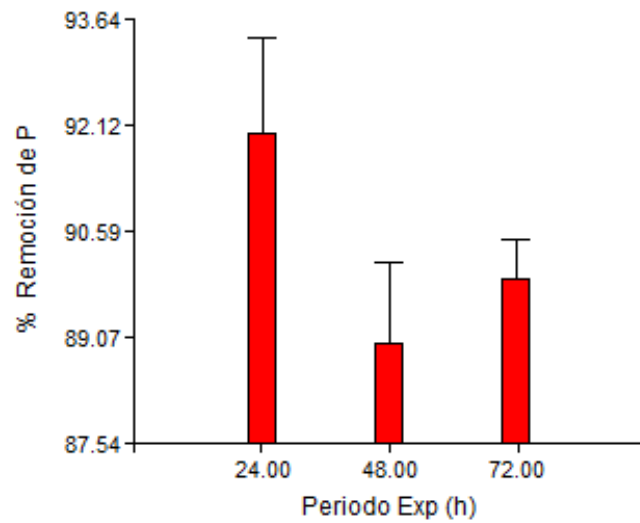


**Figura 11.** Variación de la concentración de fósforo a diferentes pH y tiempos de exposición.

Del análisis estadístico aplicado con el software Info Stat, se puede afirmar que la remoción de fósforo, por efecto de la dolomita a diferentes rangos de pH es diferente, por tanto se rechaza la hipótesis nula. Para el caso de la remoción de fósforo por efecto de la dolomita a diferentes tiempos de exposición a un tiempo de 24 horas, es significativamente diferente a la remoción obtenida a 48 horas y 72 horas, pero entre estos dos últimos, no existe diferencia significativa, el análisis fue realizado con un intervalo de confianza de 95%. (Figura 17)

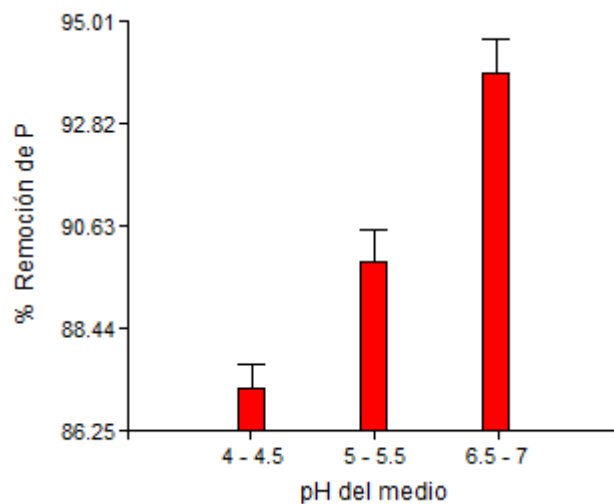
Medidas resumen							
pH del medio	Periodo Exp (h)	Variable	n	Media	D.E.	Min	Máx
4 - 4.5	24.00	% Remoción de P	3	87.57	2.17	85.10	89.20
4 - 4.5	48.00	% Remoción de P	3	85.93	0.68	85.40	86.70
4 - 4.5	72.00	% Remoción de P	3	87.97	0.81	87.10	88.70
5 - 5.5	24.00	% Remoción de P	3	91.97	1.02	90.80	92.70
5 - 5.5	48.00	% Remoción de P	3	87.57	0.93	86.80	88.60
5 - 5.5	72.00	% Remoción de P	3	90.00	0.53	89.40	90.40
6.5 - 7	24.00	% Remoción de P	3	96.50	0.70	95.80	97.20
6.5 - 7	48.00	% Remoción de P	3	93.43	0.75	92.70	94.20
6.5 - 7	72.00	% Remoción de P	3	91.70	0.92	90.90	92.70

**Figura 12.** Resumen estadístico básico de los resultados de los tratamientos



**Figura 13.** Gráfico de barras de los tratamientos aplicados a diferentes tiempos de exposición.

Se observa que en los tratamientos aplicados los resultados existe menos dispersión en los valores medidos a un tiempo de 72 horas y son confiables (Figura 13), comparado con los valores obtenidos a 24 horas y 48 horas, así lo indican la similitud de la prolongación encima de las barras.



**Figura 14.** Gráfico de barras de los tratamientos aplicados a diferentes rangos de pH.

se observa que en los tratamientos aplicados los resultados existe menos dispersión y es homogénea son confiables, así lo indican la similitud de la prolongación encima de las barras (Figura 14).

## V. CONCLUSIONES

El efecto de la variación de la concentración de nutrientes del medio acuoso indicó que a mayor concentración de nutrientes mayor es la turbidez que se genera en un tiempo de exposición de 24 horas, el cual en la investigación es un indicador asociado a la eutrofización.

La variación de pH del agua y el tiempo de contacto con dolomita influyen en la activación iónica de la dolomita cuantificado como dureza resultante del medio acuoso, donde a menor pH mayor es la concentración de la dureza y a mayor tiempo de contacto mayor es la concentración de dureza resultante.

La dolomita influye en el nivel de eutrofización del agua mediante la variación del pH y el periodo de exposición solar, donde a mayor pH de medio acuoso mayor remoción de fósforo, y a mayor tiempo de exposición menor es la remoción de fósforo.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

Es importante realizar una investigación complementaria a la presente, evaluando otros factores de influencia, tales, como especies de algas presentes en el medio acuoso, diámetro de partículas, concentración inicial de nutrientes y considerar variables intermitentes con la temperatura y el oxígeno disuelto.

Investigar el efecto de la dolomita aplicada con modificaciones en la superficie del mineral para incrementar su potencial de remoción de fósforo.

Desarrollar investigaciones para comparar los procesos de remoción de fósforo con dolomita, aplicada como coagulante y como adsorbente.

Investigar el efecto de la dolomita en la reducción de nutrientes en aguas residuales, utilizando la formación de estruvita como un indicador de eficiencia del tratamiento.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alarcón, B., & Ñique, M. (2014). Índice de calidad del agua según NSF del humedal laguna Los Milagros (Tingo María, Perú). *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 2(2), 98-107 Doi:10.25127/indes.201402.010. <https://doi.org/10.25127/indes.20142.81>.
- Alvarado, J. N., Hong, S.-H., Lee, C.-G., & Park, S.-J. (2020). Comparison of capping and mixing of calcined dolomite and zeolite for interrupting the release of nutrients from contaminated lake sediment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 15045-15056. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08058-y>.
- APHA. (2005). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* (21.<sup>a</sup> ed.).
- Arfiati, D., Kumala D., Lailiyah S., Dina K. (2021). Utilization of semi-aerobic bamboo lid to decrease organic matter. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 674, 012001 doi:10.1088/1755-1315/674/1/012001.
- Ayoub, G. M., Kalinian, H., & Zayyat, R. (2019). Efficient phosphate removal from contaminated water using functional raw dolomite powder. *SN Applied Sciences*, 1(7), 802. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0833-5>.
- Ayoub, G.M., Kalinian, H. & Zayyat, R (2019). Efficient phosphate removal from contaminated water using functional raw dolomite powder. *SN Appl. Sci.* 1, 802. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0833-5>
- Badamasi H., Yaro M., Ibrahim A., Bashir I. (2019). Impacts of Phosphates on Water Quality and Aquatic Life. *Chemistry Research Journal*, 4(3):124-133. <https://chemrj.org/download/vol-4-iss-3-2019/chemrj-2019-04-03-124-133.pdf>.
- Bañkowska, A., Blazejczyk, A., Eiche, E., Fischer, U., & Popek, Z. (2020). Phosphorus Inactivation in Lake Sediments Using Calcite Materials and Controlled Resuspension—Mechanism and Efficiency. *Minerals*, 10(3), 223. <https://doi.org/10.3390/min10030223>.
- Barloková D., Ilavský J., Kapusta O., Šimko V. (2017). Importance of calcium and magnesium in water - water hardening. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* ,92, 012002 doi :10.1088/1755-1315/92/1/012002.
- Basilio, J. C. (2015). Influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb<sup>2+</sup>) utilizando dolomita como adsorbente. [ tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1704>.

- Brack Egg, Antonio y Mendiola, Cecilia. (2000). *Ecología del Perú*. Editorial Bruño/PNUD, Lima, Perú.
- Camacho-Ballesteros, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Can-Chulim, Á. (2020). Indicadores de calidad físico-química de las aguas residuales del estado de Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 361-375. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.610>
- Da Cunha J., Palma R. , De Oliveira A., Marques M., De Alvarenga C.(2020). Water hardness and pH in the effectiveness of glyphosate formulations. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 40 (4),555-560. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n4p555-560/2020>.
- Feebarani J.(2023). An Investigation of Water Hardness in Household Open Wells across Six Districts in Kerala, *Biological Forum – An International Journal* 15(3): 815-821.
- Fernández, I. (2022). La Eutrofización: qué es, causas, consecuencias y soluciones. [Noticia]. Greenteach.Recuperado de <https://www.greenteach.es/eutrofizacion/> [ 10 de abril de 2024].
- Goldsberry P., Jeppesen, P., McLean J., Sims R.(2023).An attached microalgae platform for recycling phosphorus through biologically mediated fertilizer formation and biomass cultivation, *Cleaner Engineering and Technology*,17,100701. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100701>.
- Haddad, K., Jellali, S., Jeguirim, M., Trabelsi, A.B.H., Limousy, L.,(2018). Investigations on phosphorus recovery from aqueous solutions by biochars derived from magnesium-pretreated cypress sawdust. *J. Environ. Manag.* 216, 305–314..
- Haternboern (2024). Dolomite Filter Material [Ficha comercial]. Hatenboer-Water. Recuperado de <https://www.hatenboer-water.com/products/dolomite-minerals/> [8 de abril de 2024].
- Huh, J.-H., Choi, Y.-H., Lee, S. H., Cheong, S. H., & Ahn, J. W. (2017). Control of Algal Blooms in Eutrophic Water Using Porous Dolomite Granules. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 54(2), 108-113. <https://doi.org/10.4191/kcers.2017.54.2.05>.
- Jae-Hoon Huh, Young-Hoon Choi, Shin Haeng Lee, Sun Hee Cheong, and Ji Whan Ahn.(2017). Control of Algal Blooms in Eutrophic Water Using Porous Dolomite Granules. *Journal of the Korean Ceramic Society* 54,(2) 108~113. <https://doi.org/10.4191/kcers.2017.54.2.05>
- Jamil, N.A., Patah, M.F.A., Junaidi, M.U.M. *et al.* (2024). Dolomite as a potential adsorbent in water treatment: pH, turbidity and Pb (II) removal studies. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **21**, 5669–5680 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05375-w>.

- Jing Li, Bing Li, Haiming Huang, Xiaomei Lv, Ning Zhao, Guojun Guo, Dingding Zhang,(2019).Removal of phosphate from aqueous solution by dolomite-modified biochar derived from urban dewatered sewage sludge,*Science of The Total Environment*, 687, 460-469,<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.400>.
- Jurado-Davila, I., Schneider H., Estumano D., F  risL.(2023). Phosphate removal using dolomite modified with ultrasound: mathematical and experimental analysis, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, DOI: 10.1080/10934529.2023.2196928.
- Lucas, J. J., & Romero, L. R. (2015). Determinación del pH y tamaño de partícula óptimos para la remoción de arsénico con dolomita del agua potable de Jauja Metropolitana. [ Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3737>
- Lupt  kov   A., Derco J. (2015). Improving Drinking Water Quality by Remineralisation, *Acta Chim. Slov.* 859(62), 859–866, DOI: 10.17344/acsi.2015.1590.
- Moreno, D. P., Quintero, J., & Lopez, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78, 25-33.
- Nam, G., Choi, Y.-H., Lee, N., & Ahn, J. (2017). Effect by Alkaline Flocculation of Algae and Phosphorous from Water Using a Calcined Waste Oyster Shell. *Water*, 9(9), 661. <https://doi.org/10.3390/w9090661>.
- Pesonen, Janne, Pekka Myllymäki, Sari Tuomikoski, Gwen Vervecken, Tao Hu, Hanna Prokkola, Pekka Tynj  l  , and Ulla Lassi. (2019). Use of Calcined Dolomite as Chemical Precipitant in the Simultaneous Removal of Ammonium and Phosphate from Synthetic Wastewater and from Agricultural Sludge. *ChemEngineering* 3,2:40. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3020040>.
- Piol, M. N., Paricoto, M., Saralegui, A. B., Basack, S., Vullo, D., & Boeykens, S. P. (2019). Dolomite used in phosphate water treatment: Desorption processes, recovery, reuse and final disposition. *Journal of Environmental Management*, 237, 359–364.
- Pokrovsky O., Golubev S., Schott J., Castillo A.(2009). Calcite, dolomite and magnesite dissolution kinetics in aqueous solutions at acid to circumneutral pH, 25 to 150   C and 1 to 55 atm pCO<sub>2</sub>: New constraints on CO<sub>2</sub> sequestration in sedimentary basins. *Chemical Geology* (265),1–2, 20-32, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.013>.
- Pulgar Vidal, Javier. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. En Terra Brasilis (Nova Serie), tercer número.
- Ruiz, A. J. (2018). Tratamiento de aguas acidas con dolomita para disminuir la concentración de Cu y Zn en efluentes de la planta concentradora victoria en la Provincia de Yauli – La

- Oroya. [Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5369>.
- Shah, K. H., Ayub, M., Fahad, M., Billa, M., Amin, B. A. Z., & Hussain, Z. (2019). Natural dolomite as a low-cost adsorbent for efficient removal of As(III) from aqueous solutions. *Materials Research Express*. doi:10.1088/2053-1591/ab24f8.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2023, junio). Boletín Hidroclimático mensual, dirección zonal 10 Huánuco, N°06. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/04401SENA-125.pdf>.
- Solovchenko A., Nedbal L., Verschoor A.(2016). Phosphorus from wastewater to crops: An alternative path involving microalgae. *Biotechnology Advances*. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.01.002.
- Xing B, Chen T, Liu H, Qing C, Xie J, Xie Q (2017) Removal of phosphate from aqueous solution by activated siderite ore: preparation, performance and mechanism. *J Taiwan Inst Chem Eng* 80:875–882. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.07.016>.
- Xu N, Chen M, Zhou K, Wang Y, Yin H, Chen Z (2014) Retention of phosphorus on calcite and dolomite: speciation and modeling. *RSC Adv* 4:35205–35214. <https://doi.org/10.1039/C4RA05461J>
- Yang C. (2022). Review on the Causes of Eutrophication in Water. Proceedings of the 2022 6th International Seminar on Education, Management and Social Sciences (ISEMSS 2022)., *ASSEHR* 687, 246–252. [https://doi.org/10.2991/978-2-494069-31-2\\_30](https://doi.org/10.2991/978-2-494069-31-2_30).
- Zamparas, M. G., Kyriakopoulos, G. L. (Eds.). (2021). *Chemical Lake Restoration*. doi:10.1007/978-3-030-76380-0.

## VIII. ANEXO

### 8.1. Datos experimentales de la investigación

**Tabla 9.** Determinación experimental del efecto de la roca fosfórica en la apariencia del agua, relacionado por el valor de turbiedad

Tratamiento	Repetición	Tiempo (horas)	Turbiedad (UNT)
T0 (Testigo)	1	24	4
T0 (Testigo)	2	24	4
T0 (Testigo)	3	24	5
T0 (Testigo)	4	24	4
T1 (25 g roca fosfórica)	1	24	18
T1 (25 g roca fosfórica)	2	24	18
T1 (25 g roca fosfórica)	3	24	16
T1 (25 g roca fosfórica)	4	24	17
T2 (50 g roca fosfórica)	1	24	31
T2 (50 g roca fosfórica)	2	24	34
T2 (50 g roca fosfórica)	3	24	33
T2 (50 g roca fosfórica)	4	24	30
T3 (75 g roca fosfórica)	1	24	93
T3 (75 g roca fosfórica)	2	24	93
T3 (75 g roca fosfórica)	3	24	95
T3 (75 g roca fosfórica)	4	24	93

**Tabla 10.** Determinación de la dureza del medio acuoso a diferentes tiempos y pH del medio.

Tratamiento	Repetición	Tiempo		Dureza
		(horas)	pH	(mgCaCO <sub>3</sub> /L)
T0	1	24	7.0	18.4
T0	2	24	7.0	19.5
T0	3	24	7.0	19.2
T0	4	24	7.0	18.9
T0	1	48	7.0	20.5
T0	2	48	7.0	21.2
T0	3	48	7.0	20.2
T0	4	48	7.0	19.8
T0	1	72	7.0	22.2
T0	2	72	7.0	22.4
T0	3	72	7.0	23.1
T0	4	73	7.0	23.0
T1	1	0	4.0	190.4
T1	2	0	4.0	191.5
T1	3	0	4.0	191.2
T1	4	0	4.0	190.4
T1	1	24	4.0	192.4
T1	2	24	4.0	192.5
T1	3	24	4.0	193.2
T1	4	24	4.0	192.8
T1	1	48	4.0	195.0
T1	2	48	4.0	197.2
T1	3	48	4.0	195.8
T1	4	48	4.0	196.0
T1	1	72	4.0	198.0
T1	2	72	4.0	200.0
T1	3	72	4.0	199.5
T1	4	72	4.0	195.0
T2	1	0	5.0	110.0
T2	2	0	5.0	111.2
T2	3	0	5.0	110.5

---

T2	4	0	5.0	110.2
T2	1	24	5.0	112.0
T2	2	24	5.0	112.8
T2	3	24	5.0	113.2
T2	4	24	5.0	112.0
T2	1	48	5.0	113.5
T2	2	48	5.0	114.0
T2	3	48	5.0	114.2
T2	4	48	5.0	114.0
T2	1	72	5.0	115.5
T2	2	72	5.0	119.6
T2	3	72	5.0	110.0
T3	4	72	6.0	108.5
T3	1	0	6.0	90.0
T3	2	0	6.0	91.0
T3	3	0	6.0	90.2
T3	4	0	6.0	92.2
T3	1	24	6.0	93.5
T3	2	24	6.0	94.5
T3	3	24	6.0	94.2
T3	4	24	6.0	93.0
T3	1	48	6.0	96.2
T3	2	48	6.0	98.0
T3	3	48	6.0	95.4
T3	4	48	6.0	97.0
T3	1	72	6.0	98.5
T3	2	72	6.0	96.5
T3	3	72	6.0	95.6
T3	4	72	6.0	102.5

---

**Tabla 11.** Determinación experimental de fosfatos y cálculo de fósforo a diferentes tiempos de exposición y pH.

Tto	Rep.	Conc		Dolomita (g)	pH del medio	Fosfato	Conc.	%
		inicial P(g/L)	Periodo Exp			final (ppm)	Final P (g/L)	Remoción de P
T1	1R	11.98	24	100	4.3	4	1.29	89.2
	2R	11.98	24	100	4.2	4	1.39	88.4
	3R	11.98	24	100	4.2	5	1.79	85.1
T2	1R	11.98	24	100	5.1	3	0.87	92.7
	2R	11.98	24	100	5.3	3	0.91	92.4
	3R	11.98	24	100	5.2	3	1.10	90.8
T3	1R	11.98	24	100	6.8	1	0.42	96.5
	2R	11.98	24	100	6.8	2	0.50	95.8
	3R	11.98	24	100	7	1	0.34	97.2
T4	1R	11.98	48	100	4.3	5	1.75	85.4
	2R	11.98	48	100	4.1	5	1.71	85.7
	3R	11.98	48	100	4.2	5	1.59	86.7
T5	1R	11.98	48	100	5.3	5	1.52	87.3
	2R	11.98	48	100	5.2	4	1.37	88.6
	3R	11.98	48	100	5.5	5	1.58	86.8
T6	1R	11.98	48	100	6.8	2	0.79	93.4
	2R	11.98	48	100	6.8	2	0.69	94.2
	3R	11.98	48	100	6.9	3	0.87	92.7
T7	1R	11.98	72	100	4.2	5	1.55	87.1
	2R	11.98	72	100	4.3	4	1.43	88.1
	3R	11.98	72	100	4.5	4	1.35	88.7
T8	1R	11.98	72	100	5.2	4	1.15	90.4
	2R	11.98	72	100	5.5	4	1.27	89.4
	3R	11.98	72	100	5.3	4	1.17	90.2
T9	1R	11.98	72	100	6.3	3	0.87	92.7
	2R	11.98	72	100	6.3	3	1.02	91.5
	3R	11.98	72	100	6.5	3	1.09	90.9

**8.2. Resultados del análisis estadístico con el software estadístico InfoStat (Versión libre)**

Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Turbiedad (UNT)	16	1.00	1.00	3.19

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	18718.50	3	6239.50	4537.82	<0.0001
Tratamiento	18718.50	3	6239.50	4537.82	<0.0001
Error	16.50	12	1.38		
Total	18735.00	15			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.46168  
 Error: 1.3750 gl: 12

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
0	4.25	4	0.59	A
25	17.25	4	0.59	B
50	32.00	4	0.59	C
75	93.50	4	0.59	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

**Figura 15.** Análisis de varianza y prueba de Tukey para las medias de turbiedad.

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=3.0547  
 Error: 3.9861 gl: 48

Tiempo (horas)	pH	Medias	n	E.E.	
0	7	16.63	4	1.00	A
24	7	19.00	4	1.00	B
48	7	20.43	4	1.00	B
72	7	22.68	4	1.00	B
0	6	90.85	4	1.00	C
24	6	93.80	4	1.00	D
48	6	96.65	4	1.00	D
72	6	100.32	5	0.89	E
0	5	110.48	4	1.00	F
24	5	112.50	4	1.00	G
48	5	113.93	4	1.00	G
72	5	115.03	3	1.15	G
0	4	190.88	4	1.00	H
24	4	192.73	4	1.00	H
48	4	196.00	4	1.00	I
72	4	198.13	4	1.00	I

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

**Figura 16.** Prueba de Tukey de la interacción del factor tiempo (horas) y factor pH.

### Análisis de la varianza

#### ‡ Remoción de P

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
‡ Remoción de P	27	0.84	0.81	1.63

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	249.66	4	62.42	28.73	<0.0001
pH del medio	206.06	2	103.03	47.42	<0.0001
Periodo Exp (h)	43.61	2	21.80	10.04	0.0008
Error	47.79	22	2.17		
Total	297.46	26			

#### Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.74543

Error: 2.1725 gl: 22

pH del medio	Medias	n	E.E.
4 - 4.5	87.16	9	0.49 A
5 - 5.5	89.84	9	0.49 B
6.5 - 7	93.88	9	0.49 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

#### Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.74543

Error: 2.1725 gl: 22

Periodo Exp (h)	Medias	n	E.E.
48.00	88.98	9	0.49 A
72.00	89.89	9	0.49 A
24.00	92.01	9	0.49 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

#### Conc. Final P (g/L)

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Conc. Final P (g/L)	27	0.84	0.81	15.27

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	3.59	4	0.90	28.50	<0.0001
pH del medio	2.97	2	1.48	47.12	<0.0001
Periodo Exp (h)	0.62	2	0.31	9.89	0.0009
Error	0.69	22	0.03		
Total	4.28	26			

#### Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.21011

Error: 0.0315 gl: 22

pH del medio	Medias	n	E.E.
6.5 - 7	0.73	9	0.06 A
5 - 5.5	1.22	9	0.06 B
4 - 4.5	1.54	9	0.06 C

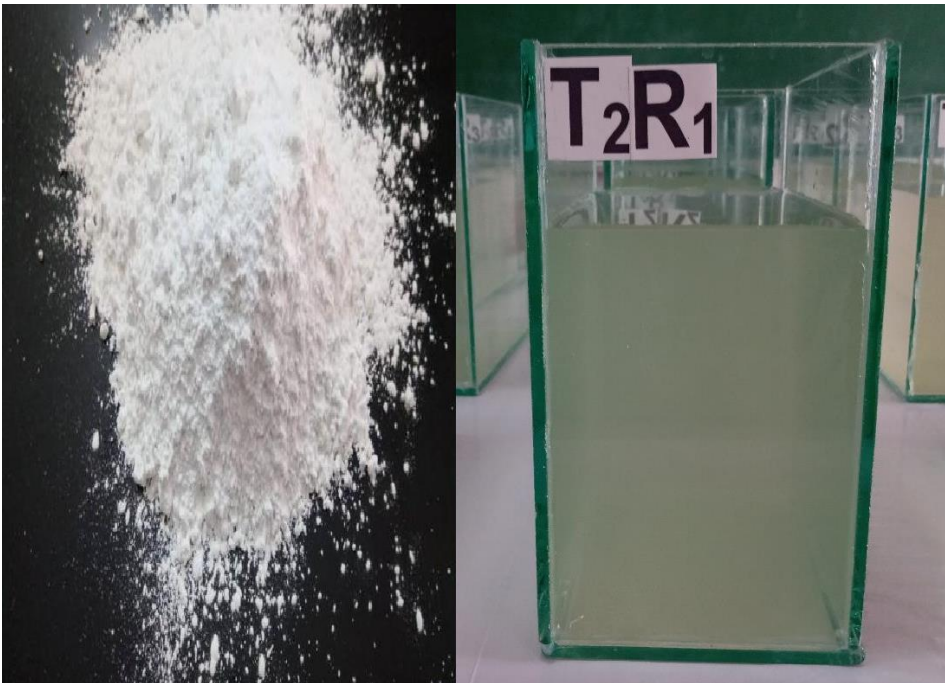
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

<b>Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.21011</b>					
Error: 0.0315 gl: 22					
Periodo Exp (h)	Medias	n	E.E.		
24.00	0.96	9	0.06	A	
72.00	1.21	9	0.06		B
48.00	1.32	9	0.06		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					
<b>Fosfato final (ppm)</b>					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
Fosfato final (ppm)	27	0.83	0.80	15.22	
<b>Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)</b>					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	32.22	4	8.06	27.50	<0.0001
pH del medio	26.00	2	13.00	44.38	<0.0001
Periodo Exp (h)	6.22	2	3.11	10.62	0.0006
Error	6.44	22	0.29		
Total	38.67	26			
<b>Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.64092</b>					
Error: 0.2929 gl: 22					
pH del medio	Medias	n	E.E.		
6.5 - 7	2.22	9	0.18	A	
5 - 5.5	3.89	9	0.18		B
4 - 4.5	4.56	9	0.18		C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					
<b>Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.64092</b>					
Error: 0.2929 gl: 22					
Periodo Exp (h)	Medias	n	E.E.		
24.00	2.89	9	0.18	A	
72.00	3.78	9	0.18		B
48.00	4.00	9	0.18		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

**Figura 17.** Análisis de varianza de los datos experimentales.



**Figura 18.** Aspecto de Dolomita utilizada en la investigación



**Figura 19.** Activación de la dolomita en medio acuoso



**Figura 20.** Roca fosfórica utilizada en la investigación



**Figura 21.** Determinación de dureza en las muestras a diferentes pH



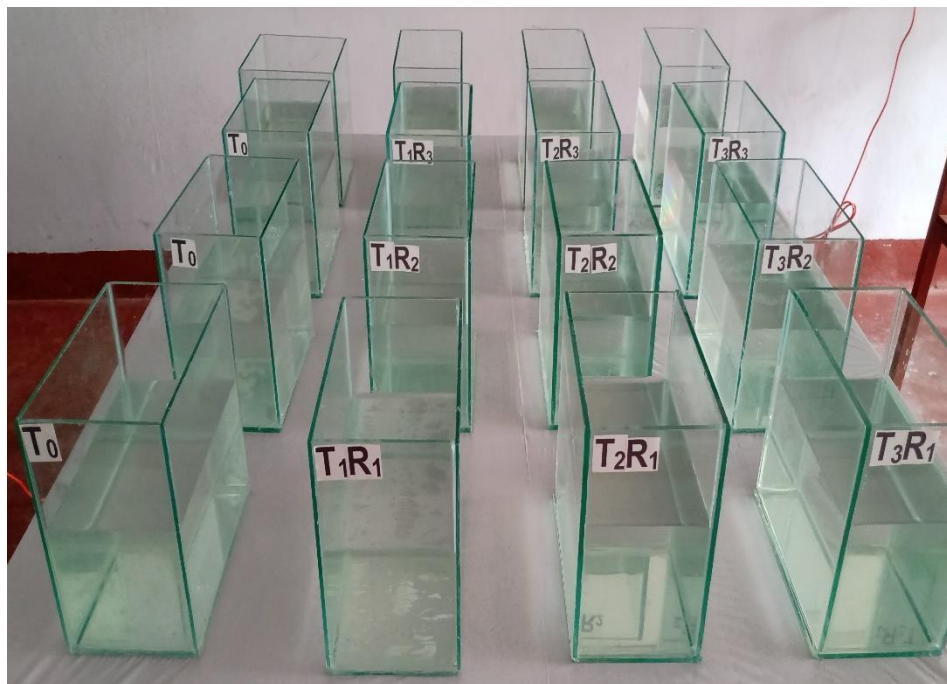
**Figura 22.** Aspecto del agua residual utilizada para preparación del medio contaminado



**Figura 23.** Exposición de las unidades experimentales a radiación a diferentes periodos



**Figura 24.** Aspecto de las muestras turbias con indicios de eutrofización



**Figura 25.** Esquema experimental para evaluación del efecto de dolomita en remoción de fósforo.



**Figura 26.** Lectura de fosfato en las muestras después del tratamiento