

Influencia de la temperatura y cobertura de la *Pistia stratiotes* en el potencial de óxido-reducción del agua residual doméstica

Jorge Antonio Delgado Soto*
<https://orcid.org/0000-0003-2275-8608>
jdelgado@unc.edu.pe
Universidad Nacional de Cajamarca
Cajamarca, Perú

Lesvi Tatiana Cotrina Rioja
<https://orcid.org/0000-0002-5376-996X>
lesvi.cotrina.epg@untrm.edu.pe
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de
Mendoza de Amazonas
Amazonas, Perú

Héctor Luis Bendezú Valle
<https://orcid.org/0009-0001-4064-3938>
hlbendezuv@unc.edu.pe
Universidad Nacional de Cajamarca
Cajamarca, Perú

Jhessica Mabel Huamán Callirgos
<https://orcid.org/0009-0005-2099-5396>
jmhuamanca@unc.edu.pe
Universidad Nacional de Cajamarca
Cajamarca, Perú

*Autor de correspondencia: jdelgado@unc.edu.pe

Recibido: (02/01/2026), Aceptado: 28/02/2026)

Resumen. El objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de la temperatura y cobertura de *Pistia stratiotes* en el potencial de óxido-reducción (ORP) del agua residual doméstica proveniente del colector de una planta de tratamiento de aguas residuales. El sistema de fitorremediación estuvo conformado por diversos tratamientos y sus respectivas réplicas. Estos consistieron en niveles crecientes de biomasa de *Pistia stratiotes*, integrando desde una muestra parcial hasta el total del componente vegetal, además de un grupo de control, compuesto por agua residual. Después de un periodo de tiempo prolongado la validación de la hipótesis comprobó que el incremento de biomasa logró efectos favorables en el ORP pasando de la fase reductora a la fase oxidante. Se concluyó que la temperatura y la cobertura de *Pistia stratiotes* influyen positivamente en el potencial redox del agua residual doméstica.

Palabras clave: agua residual, fitorremediación, potencial redox, *Pistia stratiotes*.

Influence of Temperature and Coverage of *Pistia stratiotes* on the Oxidation-Reduction Potential of Domestic Wastewater

Abstract. The objective of this research was to evaluate the influence of temperature and *Pistia stratiotes* coverage on the oxidation-reduction potential (ORP) of domestic wastewater collected from the collector of a wastewater treatment plant. The phytoremediation system consisted of several treatments and their respective replicates. These included increasing levels of *Pistia stratiotes* biomass, ranging from a partial sample to the total plant component, in addition to a control group composed of wastewater only. After a prolonged period, the validation of the hypothesis confirmed that the increase in biomass produced favorable effects on the ORP, shifting it from the reducing phase to the oxidizing phase. It was concluded that temperature and *Pistia stratiotes* coverage positively influence the redox potential of domestic wastewater.

Keywords: wastewater, phytoremediation, redox potential, *Pistia stratiotes*.

I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos enfrentan altos niveles de estrés y agotamiento debido al ingreso de materiales contaminantes. No obstante, existen ciertas especies acuáticas que tienen la capacidad de hacer frente a estas condiciones estresantes, incluso ante altas concentraciones de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua [1].

La fitorremediación es un proceso fundamentado en la biodegradación microbiana que se produce en las raíces de especies conocidas como macrófitas, las cuales facilitan la remoción de contaminantes [2]. La remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos con *Eichhornia crassipes*, *Lemna Salvinia molesta*, *Lemna minor* y *Pistia stratiotes* [3], [4] y [5], surgen como alternativas tecnológicas eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales. La capacidad depuradora de la *Pistia stratiotes*, ha sido estudiada en la determinación del potencial de fitorremediación en sistemas acuáticos contaminados con petróleo crudo [6], en la remoción de plomo y cromo en aguas superficiales [7], en la evaluación de la eficiencia para depurar aguas residuales domésticas contaminadas con metales pesados [8].

La eficiencia de estos sistemas se encuentra vinculado al potencial de óxido-reducción (*oxidation-reduction potential*, ORP) también conocido como potencial redox, parámetro que cuantifica el equilibrio entre las especies químicas oxidadas y reducidas presentes en una solución acuosa, este valor permite determinar la capacidad neta de la solución para oxidar o reducir otros compuestos. Una de las principales ventajas de monitorear el ORP es su capacidad para proporcionar datos precisos en tiempo real sobre el poder desinfectante del agua y garantizar que los procesos de tratamiento sean efectivos [9].

La investigación planteó como objetivo general evaluar la influencia de la temperatura y la cobertura de la *Pistia stratiotes* sobre en el potencial de óxido-reducción (ORP) del agua residual doméstica. Específicamente se buscó determinar la influencia de la temperatura en el potencial de óxido-reducción del agua residual doméstica tratada con *Pistia stratiotes* y determinar la cobertura óptima de *Pistia stratiotes* que permita estabilizar el potencial de óxido-reducción del agua residual doméstica. El artículo se estructura en secciones que detallan la metodología experimental basadas en gradientes de cobertura vegetal, el análisis de los registros de temperatura y la evolución del potencial redox durante el tiempo de retención hidráulica. Finalmente se presentan los resultados y discusiones que validan la eficiencia de la macrófitas en la transición de la fase reductora a oxidante en el efluente.

II. MARCO TEÓRICO

La gran cantidad de personas que viven en las ciudades, obligan a gestionar las aguas residuales que generan, esta labor se convierte en un desafío para la ciencia y tecnología [10], [11]. La fitorremediación es un tratamiento biológico que hace uso de las plantas y sus microorganismos asociados, este proceso se puede lograr a través de diferentes técnicas como la fitoextracción, rizofiltración, fitoestabilización, fitotransformación y fitodegradación, su éxito depende principalmente de la actividad fotosintética y la tasa de crecimiento de las plantas [12].

La *Pistia stratiotes* es una planta flotante y clonal, su dispersión se mejora mediante el desprendimiento de plantas hijas que formarán nuevas colonias. Los lados superiores de las hojas son de color verde claro, mientras que la parte inferior es casi blanca [13]. Tiene una alta tasa de crecimiento (60–110 t/ha/año). En su composición presenta carbohidratos 49,45(%), proteínas 16,47(%), grasa 3,56(%) y fibra cruda 17,81(%) [14]. Posee la capacidad de absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar iones, elementos o compuestos presentes en suelo, agua y aire, este proceso se potencia por la secreción de biopolímeros radiculares, que facilitan la floculación y la formación de estructuras estables, las cuales son eliminadas parcialmente por el crecimiento bacteriano [15].

El potencial de óxido-reducción (ORP), es la tendencia de una especie química a reducirse al aceptar electrones u oxidarse al donar electrones, la oxidación-reducción implica la transferencia de electrones de un ion o molécula a otro [16]. En sistemas acuáticos donde existe la presencia de macrófitas, se ha observado que los valores de ORP están condicionados a las épocas del año, a la temperatura y la concentración de oxígeno presente en el sistema.

Valores de ORP reportados para aguas residuales domésticas vertidas en una ciénaga, registraron intervalos de +237 a +239 mili voltios (mV) en los meses de febrero y junio, cuando el nivel del agua

era alto y $+73$ y $+37$ mV cuando las condiciones de oxígeno eran escasas; en los meses en que el agua bajó su nivel, las concentraciones de oxígeno estuvieron entre 2,24 y 1,0 mg/l [17]. Investigación del proceso de fitorremediación con *Cyperus ligularis* en aguas residuales descargadas a humedales, mencionan que después del tratamiento con la macrófita se presentaron cambios significativos en los valores iniciales de temperatura, pH y ORP ($27,4^{\circ}\text{C}$, 8,2 y $197,5 \pm 51,2$ mV) evolucionando hacia condiciones neutras y oxidantes ($28,4^{\circ}\text{C}$, 7.0 y $247,6 \pm 70$ mV).

Así como el incremento del ORP correlacionado con el ligero ascenso térmico, sugiere una optimización de la actividad metabólica en la rizosfera y una mayor disponibilidad de electrones favoreciendo la degradación de contaminantes en el humedal [18]. Se ha observado que el incremento de la cobertura vegetal, impulsado por condiciones térmicas favorables, potencia la transferencia de oxígeno hacia la rizosfera, elevando el ORP. Estudios estacionales con la macrófita *Myriophyllum quitense*, registraron valores de ORP de $197 \pm 15,51$ mV durante la primavera (cobertura del 80% y $13,33 \pm 1,91^{\circ}\text{C}$), mientras que en otoño, el descenso de la temperatura $7,55 \pm 1,88^{\circ}\text{C}$ y de la biomasa al 30% resultó en una reducción del ORP a $114 \pm 43,61$. Estos hallazgos confirman la existencia de relaciones directas entre el desarrollo fenológico de la macrófita, la variación de temperatura y la capacidad oxidativa del ecosistema [19].

Otro aspecto importante es el tiempo de residencia hidráulica. Al investigar la comparación de la eficiencia de la fitorremediación empleando las macrófitas *Cyperus ligularis* y *Echinochloa colonum*, en la evolución del ORP, partiendo de un registro inicial de $27,1 \pm 205$, después de un periodo de tres meses, los valores de ORP ascendieron a $247,6 \pm 70,8$ mV (*Cyperus ligularis*) y $268,3 \pm 90,6$ mV (*Echinochloa colonum*), consolidando la fitorremediación como una técnica biotecnológica eficiente para mejorar de la calidad del agua [20].

Las investigaciones descritas nos llevan a postular las siguientes teorías: La eficiencia de la fitorremediación está vinculada a la temperatura ambiental y al mayor porcentaje de cobertura vegetal. La cobertura vegetal actúa como un reactor biológico, debido a la acción de los microorganismos que habitan sus raíces y descomponen la materia orgánica del agua residual, incrementando el valor del ORP, pasando de la zona reductora (valores negativos de ORP) a la zona oxidante (valores positivos de ORP)

III. METODOLOGÍA

La investigación fue de tipo experimental, con enfoque cuantitativo, de alcance explicativo causal y diseño completamente al azar, estuvo conformada por cuatro tratamientos y un testigo, con tres réplicas por tratamiento, totalizando 15 unidades experimentales, el tamaño de muestra se justifica por el aseguramiento de la representatividad estadística, la elección de tres repeticiones, complementada con un monitoreo sistemático *in situ* durante 30 días permitió obtener datos concretos del ORP y la temperatura.

Las coordenadas de ubicación, donde se llevó a cabo la investigación fueron E: -11048153 ; N: 705931 . Las muestras de agua fueron obtenidas del colector principal de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del distrito de Bellavista, provincia de Jaén, región Cajamarca, Perú, la cual se caracterizó inicialmente en los siguientes parámetros: temperatura= $25,2^{\circ}\text{C}$, pH= $6,96$, nitratos= $42,18$, fosfatos= $7,5$, DBO= $315,22$ mg O_2/L , DQO= $625,4$ mg O_2/L y ORP= -207 mV.

La *Pistia stratiotes* fue obtenida de la ciudad de Lima, para el proceso de adaptación, las plantas fueron lavadas con agua destilada para eliminar sedimentos, insectos y detritus adheridos a las raíces, luego fueron recolectadas y colocadas en recipientes con agua con baja carga orgánica, bajo condiciones de luz natural durante 10 días, este proceso permitió estabilizar su estado fisiológico, asegurar la recolección y minimizar el estrés por manipulación. Se implementó un sistema de fitorremediación a escala de laboratorio aplicando un sistema de tratamiento de flujo discontinuo. Se emplearon recipientes de plástico, de medidas 0.55 m de largo, 0.35 m de ancho y 0.45 m de profundidad.

El volumen para cada unidad experimental fue de 35 litros. El experimento consideró: un testigo T_0 (agua residual sin cobertura), tratamiento 1 ($T_1 = 25\%$ de cobertura), tratamiento 2 ($T_2 = 50\%$ de cobertura), tratamiento 3 ($T_3 = 75\%$ de cobertura) y tratamiento 4 ($T_4 = 100\%$ de cobertura). Se realizaron tres repeticiones para cada tratamiento. Para los resultados se presentaron los promedios de los valores registrados *in situ* durante 30 días. Para el control del ORP y la temperatura se utilizó el

equipo HANA modelo HI991003, comprobando su respuesta utilizando una solución estándar de ORP HI7021L.

La estructura de la investigación consideró como variable independiente el porcentaje de cobertura de *Pistia stratiotes* (0%, 25%, 50%, 75% y 100%), como variables dependientes el ORP y la temperatura del sistema. El control de sesgos se garantizó mediante la estandarización de las variables constantes (volumen 35 litros, tiempo de retención 30 días y origen común del afluente) asegurando que las variaciones observadas en el ORP fueran producto de la actividad fitorremediadora de la *Pistia stratiotes*.

El análisis estadístico consideró una regresión lineal simple para cuantificar la influencia predictiva de la temperatura sobre el ORP, análisis de varianza para validar el factor temperatura y cobertura vegetal (tratamientos) y comparaciones múltiples de Tukey subconjuntos homogéneos para clasificar los niveles de cobertura y rangos de temperatura. La hipótesis general que se planteó fue: Existe influencia significativa de la temperatura ambiente sobre el ORP del agua residual doméstica tratada con *Pistia stratiotes*. Entre las limitaciones de la investigación podemos mencionar las condiciones climáticas naturales (no controladas), la variabilidad del agua residual doméstica.

IV. RESULTADOS

A. Evaluación de la influencia de la temperatura ambiente sobre el ORP del agua residual doméstica tratada con *Pistia stratiotes*

La evaluación de la calidad del efluente doméstico tratado con *Pistia stratiotes* requiere comprender la interacción entre el forzamiento térmico ambiental y la capacidad de oxigenación de la macrofita. El ORP actúa como un indicador del proceso fitorremediador del agua residual. Para registrar la dinámica se realizaron mediciones diarias *in situ* en cada una de las 15 unidades experimentales, durante un periodo de 30 días, generando un tamaño de muestra total de 450 observaciones para la temperatura y el ORP. En la Tabla 1 se presentan los promedios de cada repetición para cada tratamiento ($T_0 = 0\%$, $T_1 = 25\%$, $T_2 = 50\%$, $T_3 = 75\%$ y $T_4 = 100\%$ de cobertura vegetal respectivamente) para las variables temperatura y ORP. La data presentada es importante para identificar los puntos de inflexión, donde la actividad metabólica de la planta estabiliza el sistema frente a las variaciones de temperatura.

Tabla 1. Registro cronológico de 30 día de la temperatura y el ORP del agua residual.

Días	Potencial de óxido-reducción (mV)						Días	Potencial de óxido-reducción (mV)					
	Temp (°C)	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄		Temp (°C)	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
1	28.1	-317	-307	-282	-307	-318	16	27.8	41	55	61	103	116
2	25.1	-325	-315	-319	-314	-315	17	25.0	30	61	78	81	110
3	34.4	-346	-323	-330	-324	-312	18	26.2	42	59	65	99	115
4	25.5	-332	-323	-327	-326	-308	19	28.1	30	72	70	92	93
5	32.1	-313	-326	-318	-315	-267	20	26.4	12	60	58	63	83
6	26.5	-219	-293	-202	-314	-205	21	25.1	13	73	80	102	95
7	25.0	-164	-264	-198	-205	-150	22	29.9	21	66	50	91	105
8	24.5	-120	-225	-83	-150	-80	23	24.9	47	57	109	84	117
9	24.2	-80	-80	-83	-68	-38	24	25.8	61	92	114	117	119
10	24.3	-40	-63	-41	-59	30	25	24.4	65	98	99	127	114
11	24.4	16	-38	-29	-20	56	26	24.8	71	88	110	90	113
12	26.4	36	41	41	-14	95	27	24.9	75	104	114	117	116
13	26.2	42	64	36	55	112	28	25.0	80	113	126	119	115
14	25.6	22	48	66	72	121	29	25.2	86	116	114	129	123
15	25.5	20	66	65	106	122	30	25.2	93	112	119	120	132

B. Dinámica de la temperatura en el sistema de fitorremediación

La variación de la temperatura en un sistema de fitorremediación a escala de laboratorio es un factor determinante ya que condiciona la solubilidad de los gases como la tasa metabólica de la *Pistia stratiotes*. El registro de estas variables permite contextualizar las variaciones observadas en el potencial redox. A continuación se presenta la evolución térmica registrada durante el periodo de variación.

En la Figura 1 se observan los registros del monitoreo de la temperatura durante 30 días. Se evidencia que la temperatura del sistema fluctuó entre 24.2 y 34.4 °C. Al respecto [10], [11] y [13] concuerdan con las observaciones, existiendo relación directa entre la temperatura y el ORP. El perfil térmico registrado durante los 30 días evidencia una inestabilidad inicial con picos superiores a 34°C, factor que condicionó la actividad del ORP. Estas variaciones actúan como una prueba de estrés ambiental, demostrando que la transición a la fase oxidante T_3 y T_4 fue resiliente a tales variaciones. La convergencia hacia un régimen estable de 25°C en la etapa final facilitó el efecto fitorremediador de la *Pistia stratiotes*.

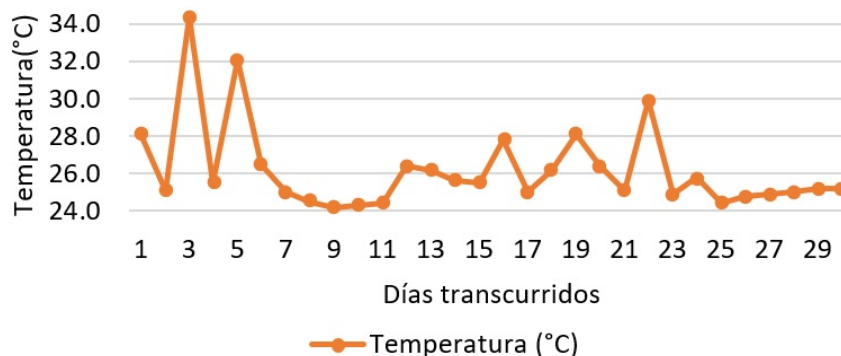


Fig. 1. Monitoreo de la temperatura en 30 días.

C. Prueba de la hipótesis para la influencia de la temperatura en el ORP

La eficiencia de la fitorremediación mediante macrófitas esta influenciada a la cinética de reacciones y al metabolismo vegetal, procesos dependientes de las condiciones de temperatura del medio. Dado que el ORP refleja la oxigenación rizoférica, el calor actúa como un catalizador que acelera la difusión gaseosa y la degradación microbiana en las raíces. Bajo esta premisa se plantea la siguiente hipótesis: H_i : Existe influencia significativa de la temperatura ambiente sobre el ORP del agua residual doméstica tratada con *Pistia stratiotes*. H_o : La temperatura ambiente no influye significativamente sobre el potencial de óxido-reducción del agua residual tratada con *Pistia stratiotes*.

D. Regresión lineal simple

Para validar la relación de dependencia entre la temperatura y la respuesta del ORP del sistema, se aplica el modelo de regresión lineal simple mostrado en la Tabla 2, este modelo cuantifica cómo las variaciones de la temperatura predicen el estado redox, valida la observación, con la cual la variable temperatura en (°C) predice la variación en el ORP promedio diario de los tratamientos.

El valor de $R^2 = 0,610$ indica que la temperatura ambiente explica el 61,0% de la variación total observada en el ORP, demostrando que la temperatura es un predictor y determinante del ORP. El cálculo de los coeficientes de regresión y sus niveles de significancia confirman si la relación observada entre las variables es producto del azar o si existe un efecto real y medible de la temperatura sobre el ORP del agua.

Tabla 2. Regresión lineal.

R	R^2	R^2 Ajustado	Error Típico de la Estimación
0,781	0,610	45,15	45,15

En la Tabla 3 se presentan los valores que definen la interacción entre la temperatura y el ORP. La temperatura ambiente es un factor altamente significativo en la determinación del ORP ($p < 0.001$). El coeficiente β positivo (+75,0 mV) establece una relación directa: por cada aumento de 1 °C el ORP se incrementa 75,0 mV.

Tabla 3. Coeficientes (Influencia y Significación).

Variable no estandarizada	Coeficiente β	Error típico	Beta (estandarizado)	T	Sig. (p-valor)
(Constante)	-1970	390	-	-5,05	< 0,001
Temperatura (°C)	75	15	0,781	5	< 0,001
ORP = -1970 + 75 · Temperatura					

E. ANOVA de una vía (efecto de la categoría de temperatura)

En la Tabla 4 se detallan los componentes de la varianza que ratifica la solides del estudio y la pertinencia de la temperatura como principal predictor. El análisis de varianza sobre la serie de datos confirma la validez del modelo predictivo y descarta que las variaciones observadas son producto del azar, este procedimiento evalúa la significancia de la variable temperatura determinando si las diferencias encontradas en el ORP en el tiempo tienen un sustento estadístico. Para la aplicación de ANOVA y Tukey categorizamos la temperatura en tres niveles Baja < 25°C, media 25-27°C, Alta > 27°C. Los resultados del análisis indican que existen diferencias altamente significativas en el ORP promedio entre las categorías de temperatura ($p < 0,001$). Esto permite rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza superior al 95%, demostrando la influencia de la temperatura sobre el ORP.

Tabla 4. Análisis de varianza.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig. (p-valor)
Entre grupos (Temperatura)	2 500,000	2	1 250,000	28,57	< 0,001
Dentro de grupos (Error)	1 180,000	27	43,705		
Total	3 680,000	29			

La Tabla 5 establece si el incremento de temperatura produce variaciones estadísticamente distintas entre sí, validando el proceso de fitorremediación ante diferentes rangos de temperatura. La prueba demostró que el agua residual cambia totalmente según el nivel de temperatura ($p < 0.05$ en todas las comparaciones), la diferencia más significativa ocurre al comparar los días de menor temperatura con los de mayor temperatura (-95), lo que confirma con comparar que el ORP depende directamente de la temperatura. Esto prueba que la capacidad del *Pistia stratiotes* para oxigenar el agua no es siempre la misma, su poder se incrementa cuando la temperatura es más alta.

Tabla 5. Prueba de Tukey

(i) Categoría de Temperatura	(j) Categoría de Temperatura	Diferencia de medias (i-j)	Error Típico	Sig. (p-valor)
Baja	Media	-55	12,5	0,001
Baja	Alta	-95	12,5	< 0,001
Media	Alta	-40	1,5	0,008

La Tabla 6 muestra la categorización del sistema, donde se aprecia los subconjuntos homogéneos, según los niveles de temperatura registrados. La agrupación permitió visualizar cómo el rendimiento del proceso de fitorremediación dividido en tres etapas diferenciadas, donde se observa que el rango de temperatura influyó sobre el ORP. La separación de los grupos confirma que no existe solapamiento entre fases, validando que el aumento de la temperatura ambiental influye en el ORP. Los resultados identifican tres grupos de rendimientos distintos: la Temperatura baja resulta en el ORP más reducido (promedio -110 mV), la temperatura media en un ORP intermedio (-55mV), y la temperatura alta en el ORP más cercano a la estabilización (-15,0 mV).

Tabla 6. Subconjuntos Homogéneos (Grupo de rendimiento por temperatura).

Categoría de Temperatura	ORP Promedio (mV)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	Subconjunto 3
Baja	–110	*		
Media	–55		*	
Alta	–15			*
Sig.		1,000	1,000	1,000

F. Determinación de la cobertura óptima de Pistia stratiotes que permita estabilizar el ORP del agua residual doméstica

Para analizar la evolución química del efluente bajo la influencia de la macrófita, se registró la dinámica del ORP durante el periodo de 30 días, esta representación permite identificar el momento exacto en que cada tratamiento pasa de la zona reductora a la zona oxidante, reflejando la eficiencia de la eficiencia de la *Pistia stratiotes* en la transferencia de oxígeno.

La Figura 2 muestra la distribución del ORP, pasando de valores negativos a positivos, al respecto los resultados mostrados por [20] señalan incrementos del ORP, de afluentes de agua residual doméstica después de un periodo de exposición de tres meses con macrófitas *Cyperus ligularis* y *Echinochloa colonum*. La evolución del ORP fue de valores menores a mayores asemejando una función sigmoide. En la fase inicial del día 0 al día 10 el ORP es negativo, con resultados de –317, –282 y –318 mV, para T₀, T₂ y T₄ respectivamente demostrando condiciones reductoras, típicas de en aguas residuales sin tratar o en condiciones de baja aireación.

El poder reductor fue disminuyendo, el día 4, los resultados fueron –332 mV, –327mV y –308mV, para para T₀, T₂ y T₄ respectivamente. En la fase de transición, los días 9, 10 y 11, los ORP se incrementaron, el día 13 los resultados fueron 42, 64 y 112 mV para T₀, T₂ y T₄ respectivamente, siendo T₄ el agua con mayor poder oxidativo. Esto podría deberse a la adaptación y oxigenación de las plantas a través de las raíces, al cese de la actividad microbiana reductora.

En la fase final el día 30 los resultados del ORP para T₀, T₂ y T₄ fueron 93, 119 y 132 mV. El ORP se estabiliza en valores positivos, condiciones oxidantes. El cambio de perfil del ORP significa agotamiento de los nitratos, este punto es descrito [21], [22], [23], [24] como rodilla de nitrato. En forma general existe una tendencia a la auto purificación, lo cual se evidencia en los tratamientos en comparación con el testigo. Al respecto la Organización Mundial de la Salud en 1972 manifiesta que, valores superiores a 650 mV de ORP son indicativos de la ausencia de contaminación bacteriológica.

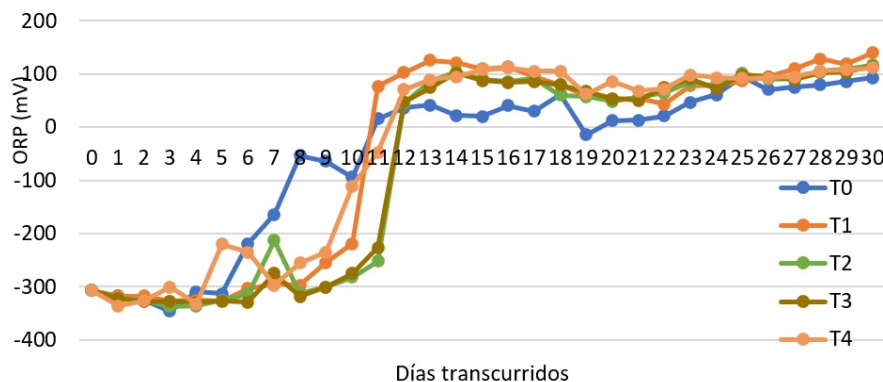


Fig. 2. Resultados del control del ORP en 30 días.

G. Prueba de hipótesis para el ORP

Considerando que la densidad de biomasa influye en la capacidad de transferencia de oxígeno hacia la rizosfera, se busca determinar el incremento de la superficie vegetal optimiza la estabilización química del efluente. Por ello, se plantea las siguientes hipótesis: H_i: Existen una cobertura óptima de *Pistia stratiotes* que resulta ser más efectiva para estabilizar el ORP del agua residual doméstica. H₀: No

existe una diferencia significativa entre los niveles de cobertura de *Pistia stratiotes* que resulta ser más efectiva para estabilizar el ORP del agua residual doméstica.

H. ANOVA de una Vía (o Prueba de Efectos Inter-Sujetos)

La Tabla 7 contrasta la hipótesis sobre el efecto de la densidad de la biomasa, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) que evalúa la influencia del nivel de cobertura sobre el ORP, permitiendo verificar si las variaciones en la estabilización del efluente son atribuibles a la cantidad de biomasa de *Pistia stratiotes* para determinar la existencia de un efecto significativo del factor vegetal, permitiendo la validación de la hipótesis. Los resultados señalan que, el valor Sig. (*p*-valor) es menor a 0,05 ($p < 0,001$) razón por la cual se rechaza la hipótesis nula, que señala que no hay diferencias entre tratamientos. Se concluye que el efecto principal de la Cobertura es altamente significativo sobre el ORP, las diferentes coberturas de *Pistia stratiotes* producen un ORP promedio significativamente diferente.

Tabla 7. Análisis de Varianza (ANOVA).

Fuente	Suma de cuadrados Tipo III	Gl	Media Cuadrática	F	Sig. (<i>p</i> -valor)
Cobertura	1 495 280,4	4	373 280,1	1 297,60	< 0,001
Error	14 400,0	50	288		
Total	1 509 680,4	54			

I. Determinación de la mejor cobertura, Prueba Post-Hoc de Tukey HSD

La Tabla 8 compara las medias del ORP para identificar el nivel de cobertura con mayor capacidad de depuración. Este análisis permite clasificar los tratamientos según su eficiencia en la estabilización del agua residual, detectando que densidad de *Pistia stratiotes* optimiza la oxigenación del efluente. En los resultados se aprecia el ORP promedio total que se alcanzó en cada nivel de cobertura durante los 30 días de monitoreo. El mejor tratamiento es T₄ (−21,20 mV), al ser el valor más cercano a cero es el que mejor oxigena el agua. El valor de T₀ (−89,03 mV) indica que el agua se mantiene en estado reductor. Se evidencia una mejora escalonada al pasar de T₁ a T₄, lo que demuestra que a mayor cobertura, mejor es la calidad del agua final.

Tabla 8. Medias de ORP por Cobertura (promedio de 30 días).

Cobertura	T4	T3	T2	T1	T0
ORP (Promedio mV)	−21,20	−59,00	−62,73	−84,00	−89,03

J. Resultados de la prueba Post-Hoc de Tukey (comparación de pares)

En la Tabla 9 se aprecia la prueba de Tukey para determinar los niveles de cobertura que son mas eficientes. El análisis permitió identificar si las diferencias observadas en el ORP entre los tratamientos son significativas o si alguno de los grupos tiene comportamiento similar. Los resultados de la comparación de pares, la cobertura T₄ es estadísticamente diferente de todas las demás coberturas, dado que todos sus *p*-valores son menores a 0,05. En contraste, tratamientos como T₃ vs T₂ ($p = 0,999$) y T₁ vs T₀ ($p = 0,993$) no presentan diferencias reales.

Tabla 9. Prueba de Tukey.

(I) Cobertura	(J) Cobertura	Diferencias de medias (I-J)	Error Típica	Sig. (<i>p</i> -valor)
T4	T3	37,80	9,8	0,001
T4	T2	41,53	9,8	< 0,001
T4	T1	62,80	9,8	< 0,001
T4	T0	67,83	9,8	< 0,001
T3	T2	−3,73	9,8	0,999
T1	T0	5,03	9,8	0,993

La Tabla 10 muestra la agrupación de los tratamientos cuyas medias no son significativamente diferentes (p -valor de la comparación es mayor que 0,05). Esto simplifica la identificación de los grupos de rendimiento). El subconjunto 1 agrupa T_0 y T_1 , las medias de ORP de estos dos tratamientos no son estadísticamente diferentes entre sí. El subconjunto 2 agrupa T_2 y T_3 , sus medias de ORP son similares. El subconjunto 3 contiene solamente a T_4 , esto significa que el ORP promedio de T_4 es estadísticamente superior a cualquier tratamiento. La cobertura T_4 es la que presenta la media de ORP más alta (menos negativa) y es estadísticamente diferente ($p < 0,005$) de todas las demás coberturas. Por lo tanto, T_4 es la cobertura más efectiva.

Tabla 10. Subconjunto homogéneo (Grupos que no son diferentes).

Cobertura	ORP Promedio (mV)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	Subconjunto 3
T0	-89,03	*		
T1	-84,00	*		
T2	-62,73		*	
T3	-59,00		*	
T4	-21,20			*
Sig.		0,993	0,999	1

CONCLUSIONES

La investigación evidencia que la temperatura es un factor que facilita la dinámica de la biomasa de *Pistia stratiotes*, favoreciendo la descontaminación del agua residual. Cuando la temperatura ambiental es elevada las raíces de la planta aceleran el proceso de descontaminación. Esto se debe a que la planta ingresa a un estado de alta actividad, acelerando la fotosíntesis, lo cual genera que las raíces secreten más oxígeno y enzimas hacia el agua, difundiendo más oxígeno al agua residual. Además la temperatura cálida hace que las bacterias incrementen la tasa de degradación de la materia orgánica presente en el agua, acelerando su metabolismo y mejorando el proceso de fitorremediación.

La observación de la variación del ORP confirma que en el proceso de fitorremediación existen periodos donde el sistema remueve la contaminación inicial, pasando de valores negativos sin oxígeno (reducción) a valores positivos con presencia de oxígeno (oxidación) iniciando la nitrificación, que es la conversión del amonio en nitrato en la zona denominada rizosfera, proceso que incrementa el ORP, esta evolución evidencia la capacidad fitorremediadora de la *Pistia stratiotes*.

La cobertura de la *Pistia stratiotes* favorece la estabilidad y eficiencia del sistema, debido a la relación directa entre mayor superficie de contacto y oxigenación, debido a que la *Pistia stratiotes* difunde el oxígeno del aire hacia sus raíces, creando una zona con alta concentración de oxígeno, incrementando el ORP. Al existir mayor cobertura vegetal, también abundarán las bacterias nitrificantes que favorecen la degradación de la materia orgánica.

RECONOCIMIENTO

Agradecimiento al laboratorio OIKOSLAB SAC, por brindarnos su apoyo.

REFERENCIAS

- [1] A. A. Ansari, M. Naeem, S. S. Gill, and F. M. Alzuaubr, "Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application," *Egyptian Journal of Aquatic Research*, vol. 46, pp. 371-376, 2020, doi: 10.1016/j.ejar.2020.03.002.
- [2] R. S. Celi Fernández, E. D. Morales Avedaño, and C. E. Andrade Ruiz, "Aplicación de la fitorremediación con macrófitas," *Rev. Soc. cient. Parag*, vol. 30, no. 2, pp. 103-113, 2025, doi: 10.32480/rscp.2025.30.2.103113.

- [3] E. S. Ríos Rivera, "Uso de pistia stratiotes y eichhornia crassipes para la biorremediación de efluentes piscícolas," Tesis para optar el título de ingeniero en manejo de cuencas y ambiente, Universidad de Panamá, 2023, disponible en: <http://up-rid.up.ac.pa/id/eprint/7745>.
- [4] H. M. Mustafa and G. Hayder, "Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, pp. 355–365, 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.05.009.
- [5] S. N. Khan, L. Anjum, A. Arshad, S. Ali, M. Aleem, and A. Nasir, "Nature-based solution for wastewater treatment and reuse using phytoremediation with floating plants," *Water*, vol. 17, no. 7, pp. 1–16, 2025, doi: 10.3390/w17071080.
- [6] O. E. Bernard and E. T. Chukwuemeka, "Phytoremediation of crude oil polluted water by pistia stratiotes l." *Plant Sci*, vol. 15, pp. 17–20, 2020, doi: 10.3923/jps.2020.17.21.
- [7] C. Huaroc Osorio and P. L. MartinezPalacio, "Fitorremediación de plomo y cromo total con lechuga de agua (pistia stratiotes) en aguas superficiales del río andaychagua, provincia de yauli, 2021," Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Continental, Lima, 2020, disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/389acc00-520e-482a-ae62-eefbe9cc21b1/content>.
- [8] A. Lozano-Chung, C. M. Lozano-Carranza, and R. D. Colichon-Carranza, "Plantas macrófitas (eichhornia crassipes y pistia stratiotes) como depurador de metales pesados en aguas residuales domésticas," *Rev Amaz Cienc Ambient Ecol*, vol. 3, no. 2, p. 688, jul 2024, doi: 10.51252/reacae.v3i2.688.
- [9] M. E. Mérida Cano, "Calidad bacteriológica del agua y su relación con el potencial de óxido reducción (orp)," *Agua, Saneamiento & Ambiente*, vol. 15, no. 1, pp. 41–47, 2020, doi: 10.36829/08ASA.v15i1.1130.
- [10] R. Cervantes Rivera, R. A. M. Frisancho de Martínez, A. A. Mamani, E. A. Vera Medina, and L. F. Ticona Lecaro, "Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil," *Revista Athenea*, vol. 6, no. 22, pp. 80–99, 2025, doi: 10.47460/athenea.v6i22.118.
- [11] R. Martínez Cabrera, J. C. Minga, and M. M. Paricoto Simón, "Impacto de plantas de aguas residuales: una evaluación desde la ingeniería ambiental," *Revista Athenea*, vol. 7, no. 23, pp. 08–17, 2026, doi: 10.47460/athenea.v7i23.122.
- [12] Y. I. Mendoza, J. I. Pérez, and A. A. Galindo, "Evaluación del aporte de las plantas acuáticas pistia stratiotes y eichhornia crassipes en el tratamiento de aguas residuales," *Información tecnológica*, vol. 29, no. 2, pp. 205–214, 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000200205.
- [13] B. J. Obando Zambrano and L. A. Bermúdez Carrillo, "Producción de papel obtenido de la planta pistia stratiotes," *Intersedes*, vol. 24, no. 50, pp. 174–189, 2023, doi: 10.15517/isucr.v24i50.51425.
- [14] M. Kaura, M. Kumarb, S. Sachdevaa, and S. K. Purib, "Aquatic weeds as the next generation feedstock for sustainable bioenergy production," *Bioresource Technology*, vol. 251, pp. 390–402, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.11.082.
- [15] Abbasi and Ramasami, *Métodos biotecnológicos del control de la contaminación*. Universities Press, 1999.

- [16] C. Mobilian and C. B. Craft, "Wetland soils: Physical and chemical properties and biogeochemical processes," in *Encyclopedia of Inland Waters, Second Edition*, 2022, pp. 157-168, doi: 10.1016/B978-0-12-819166-8.00049-9.
- [17] D. Chalarca, R. Mejía, and J. Aguirre, "Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga," *Revista científica de la Facultad de Ingeniería*, no. 40, pp. 41-58, 2007, disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n40/n40a03.pdf>.
- [18] H. Casierra Martínez, J. Casalins Blanco, X. Vargas Ramírez, and A. Caselles Osorio, "Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso," *Revista científica. Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 7, no. 4, pp. 97-111, 2016, iSSN 0187-8336. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n4/2007-2422-tca-7-04-00097.pdf>.
- [19] F. Cuassolo, B. Estela Mondenutti, and E. G. Balseiro, "El papel de las macrófitas en las relaciones elementales de humedales patagónicos," Tesis doctoral en Biología, Universidad Nacional de Comahue, 2013, disponible en: <https://rdi.uncoma.edu.ar/bitstream/handle/uncomaid/16108/Cuassolo%20Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [20] J. C. Charris and A. Caselles Osorio, "Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con cyperus ligularis y echinochloa colonum," *Tecnología y Ciencia del Agua*, vol. 2, no. 6, pp. 93-103, 2016, disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n6/2007-2422-tca-7-06-00093.pdf>.
- [21] J. Guo *et al.*, "Biological nitrogen removal with real-time control using step-feed SBR technology," *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 40, no. 6, pp. 1564-1569, 2007, doi: 10.1016/j.enzmtec.2006.11.001.
- [22] Z. Hu, "Biomass characteristics in three sequencing batch reactors treating a wastewater containing synthetic organic chemicals," *Water Research*, vol. 39, pp. 710-720, 2005, doi: 10.1016/j.watres.2004.11.018.
- [23] A. Qureshi, "Real-time treatment of dairy manure: Implications of oxidation reduction potential regimes to nutrient management strategies," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 5, pp. 1169-1176, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.02.046.
- [24] J. Yan and Y. Hu, "Comparison of partial nitrification to nitrite for ammonium-rich organic wastewater in sequencing batch reactors and continuous stirred-tank reactor at laboratory-scale," *Water Science and Technology*, vol. 60, no. 11, pp. 2861-2868, 2009, doi: 10.2166/wst.2009.719.