



DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.381>

Aplicación de las ecuaciones de Monod para remediación de suelos afectados por incendios forestales en el oriente boliviano

Roberto Carlos Vera

robertormc@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3335-9832>

Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Evangélica Boliviana (UEB)
Santa Cruz-Bolivia

Paola Mercedes Parra Rojas

<https://orcid.org/0000-0001-7219-0040>

Carrera de Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno (UAGRM)
Santa Cruz, Bolivia

Erwin Ricardo Torrico Uzqueda

erwin187@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-0650-708X>

Investigador Independiente
Cochabamba-Bolivia

Wilson Angel Gutiérrez Rodríguez

<https://orcid.org/0000-0001-8188-1441>

Facultad Técnica, Universidad Técnica de Oruro (UTO)
Oruro, Bolivia

RESUMEN

Los incendios forestales recurrentes en el oriente boliviano, afectan y degradan la calidad del suelo por ello se planteó el Objetivo: Análisis de un sistema termodinámico abierto ecoambiental para el proceso de la interacción en la descomposición de materia orgánica que permita regenerar microorganismos y recuperar/fortificar el suelo afectado por incendios forestales en la región de Santa Cruz. Se aplicó una metodología explicativa y longitudinal, observaciones satelitales FIRMS NASA, GISS, Windy, y análisis de laboratorio en 15 sitios, donde se aplican las ecuaciones de Monod para remediación del suelo. Los resultados, revelan un incremento del 67% en áreas quemadas, con anomalías térmicas de +1.2°C, reducción del carbono orgánico (3.5-2.1%), nitrógeno (120-66 kg/ha) y biomasa microbiana entre un orden de tres a cuatro de magnitud, la erosión hídrica incremento del 40% al 60%, con un $r=0.82$, demostrando el deterioro de los humedales con alta sedimentación y sequías. Para esta acción se propone un sistema de biorreactor ecoambiental que reduce carga orgánica 63.2% en periodos cortos, y además de la evidencia del incremento de la biomasa de 1 a 23.53 g/L. Se concluye que el sistema ecoambiental valida una biorremediación efectiva, restaurando resiliencia edáfica e hidrológica bajo ODS15

Palabras clave: Recuperación de suelo, ecuación de Monod, microorganismos, biorremediación



Application of Monod equations for remediation of soils affected by forest fires in eastern Bolivia

ABSTRACT

Recurrent forest fires in eastern Bolivia affect and degrade soil quality. Therefore, the objective was to analyze an open thermodynamic eco-environmental system for the interaction process in the decomposition of organic matter, enabling the regeneration of microorganisms and the recovery/strengthening of soil affected by forest fires in the Santa Cruz region. An explanatory and longitudinal methodology was applied, using satellite observations from NASA FIRMS, GISS, and Windy, and laboratory analysis at 15 sites, where Monod's equations were applied for soil remeasurement. The results reveal a 67% increase in burned areas, with thermal anomalies of +1.2°C, a reduction in organic carbon (3.5-2.1%), nitrogen (120-66 kg/ha), and microbial biomass of three to four times the magnitude. Water erosion increased from 40% to 60%, with an $r=0.82$, demonstrating the deterioration of wetlands with high sedimentation and drought. To address this, an eco-environmental bioreactor system is proposed that reduces organic load by 63.2% in short periods, and also demonstrates an increase in biomass from 1 to 23.53 g/L. It is concluded that the eco-environmental system validates effective bioremediation, restoring soil and hydrological resilience in line with SDG 15.

Keywords: Soil recovery, Monod equation, microorganisms, bioremediation



INTRODUCCIÓN

La crisis climática en la cual se atraviesa, está vinculada a la contaminación antropogénica el mismo que tiene su impacto en los ciclos naturales y de los patrones meteorológicos del planeta, donde la sobrepoblación humana, la expansión geográfica vinculada a la expansión agroindustrial afectando a los bosques y humedales, siendo estas áreas los que regulan el clima y la biodiversidad (ONU, 2025). En base a los documentos publicados por la OMS (2024), la inocuidad alimentaria, nutrición y seguridad están interconectadas, en el último periodo se registraron alrededor de 600 millones de casos en enfermedades por alimentos contaminados, con resultando de 420.000 muertes y pérdidas de USD 110.000 millones en productividad y costos médicos, predominantemente en países de ingresos bajos y medianos (OMS, 2024). Debió a esta causa, la dinámica de la deforestación que ocurre para expandir cultivos y/o pastizales ganaderos, desencadenan los incendios forestales, afectando de manera directa a la salud ambiental y la biodiversidad. La ONU, enfatiza que: después de la pandemia del 2020 muchos países han incrementado la deforestación y con ello las intensidades de los incendios en áreas de los principales bosques, la expansión agrícola afecta a una gestión integrada, más allá de problema forestal (ONU, 2025). Es así que para el 2001-2023, se evidenció una superficie afectada por incendios con un crecimiento de 5.4% anual, alcanzando un promedio de 6 millones de hectáreas adicionales por año, equivalente al tamaño de Croacia (Watch, 2023). Otros estudios describen que el 79.99% de pérdidas globales de cobertura arbórea (2000-2020), con invasión agrícola del 44.38% y actividad forestal del 11.91% como principales contribuyentes, duplicando las tasas sin signos de detención (Wendi Liu, 2025). En Europa, 234.516 hectáreas fueron quemadas hasta julio 2023, afectaron a los países mediterráneos (Comission, 2024). De acuerdo a Stannus (2023) en Canadá, 11.598 eventos que se registraron en el periodo del 2023 quemaron más de 10 millones de hectáreas, llegando un promedio del 70.5% dentro del quinquenio del 2017-2022, bajo el modelo del triángulo del fuego (calor, oxígeno, biomasa) (Stannus, 2023). Estos respaldos científicos, pone en un análisis de la celeridad en la cual atraviesa el planeta, originando sequías, incremento de la temperatura promedio, incremento de las olas de calor que afectan a la salud de los seres vivos. Los reporten indican que las emisiones de CO₂ debido a los incendios forestales aumentaron un 60% en dos décadas, causando pérdidas



multimillonarias en infraestructura, agricultura y turismo, junto con impactos sanitarios e incremento de las intoxicaciones por humo (IPCC, 2022).

Para el continente de América del Sur, los incendios forestales alcanzaron niveles críticos en la Amazonía con un incremento del 152% en 2023, afectando 11.8 millones de hectáreas en Brasil, Bolivia y Perú, en el Pantanal perdió 26% de superficie en 2020, dificultando recuperación por intensidad antropogénica (Lapola, 2023). En Bolivia, los incendios son controvertidos y políticos, causando deforestación masiva en el oriente, con promedio de 2.7% de pérdida boscosa por incendios (Andersen, 2023). Sin embargo, el 2023 fue el más crítico superando los tres millones de hectáreas quemadas con un 70% registrado en Santa Cruz (FAN, 2023). Hasta octubre 2024, se evidenció una pérdida 2.5 millones de hectáreas impactadas, ligadas a chaqueos para soya/ganadería; 90% incontrolables, incentivados por DS 3973 (2019), limitando la fiscalización de ABT y propagando humo urbano (Rodríguez, 2022), llegándose a declarar emergencia nacional en diferentes periodos del 2020 al 2024 (Ministerio de Defensa, 2024). Sin embargo, los retos persisten con políticas contradictorias como: la agricultura extensiva y la escasa fiscalización. Además, las proyecciones indican que más del 50% de incendios afectarán crudamente la población en años posteriores, lo que urge tecnología, políticas y participación comunitaria en regiones vulnerables (FAN, 2025).

Ante esta situación, la gran problemática en toda la región del oriente boliviano por causa de los incendios forestales y/o Chaqueos recurrentes tiene su impacto en la calidad de la salud ambiental, los cuales degradan los suelos y humedales, amenazando la biodiversidad y sostenibilidad. Uno de las causas es la política ambigua del DS 3973, mismo que fomentan deforestación, generando malestar en toda la sociedad (Rodríguez, 2022), junto a este se evidencia el incremento de CO₂ los cuales alteran los ciclos alterando atmosféricos y termodinámicos del suelo, con temperaturas que superan en promedio los 250°C, afectando a la volatilidad de los nutrientes que reducen infiltración (Úbeda et al., 2023), como también afecta a los microorganismos, las propiedades reológicas y conservación de humedad, convirtiendo áreas boscosas en secas (Bünemann et al., 2018). Es importante considerar que la degradación edáfica promueve sequías y sedimentación en humedales, con 60-80% de variabilidad atribuible a alteraciones del suelo (David M. Lapola, 2023). La falta de análisis científico y de datos



profundos sobre transmisión térmica en Santa Cruz agrava el problema, que afecta a la economía agrícola y los ciclos hídricos de la región. Con base a estos aspectos la degradación ambiental en Santa Cruz, está afectada por incendios recurrentes para expansión agrícola y ganadera (Banco Mundial, 2025), donde los incendios destruyen materia orgánica, alterando propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reduciendo diversidad microbiana esencial para fertilidad (FAO, 2016).

Estas acciones impactan en los humedales que son vulnerables, por reducción en retención hídrica y/o incrementando el grado de evaporación, generando una crisis ambiental en comunidades dependientes (Quintana, 2018). Por ello es importante analizar efectos termodinámicos que proporciona conocimiento para restauración y conocimiento sobre impactos en humedales (Kuchara et al., 2023), permitiendo así considerar estrategias en el manejo sostenible, además del monitoreo en la toma de decisiones por instituciones como ABT (ABT, 2022), donde es importante el fortaleciendo de conservación y bienestar, con integración de suelo y microorganismos con degradación de humedales, adaptado al contexto boliviano. Es así que se consideró el análisis de un sistema termodinámico abierto ecoambiental para el proceso de la interacción en la descomposición de materia orgánica que permita regenerar microorganismos y recuperar/fortificar el suelo afectado por incendios forestales en la región de Santa Cruz. Par esta situación se considera la aplicación del modelo matemático Monod que permiten evidenciar las variables del suelo degradado en función del tiempo descritas en las siguientes ecuaciones:

Descomposición de Materia Orgánica

$$C_{(t)} = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

Crecimiento Microbiano

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{(K_s + S)} \quad (2)$$

Procedimiento para el consumo del Sustrato

$$S_t = S_0 e^{-kt} \quad (3)$$

Estas ecuaciones permiten modelar los eventos en el contexto de los incendios forestales que sucede en los cambios de suelo.



METODOLOGÍA

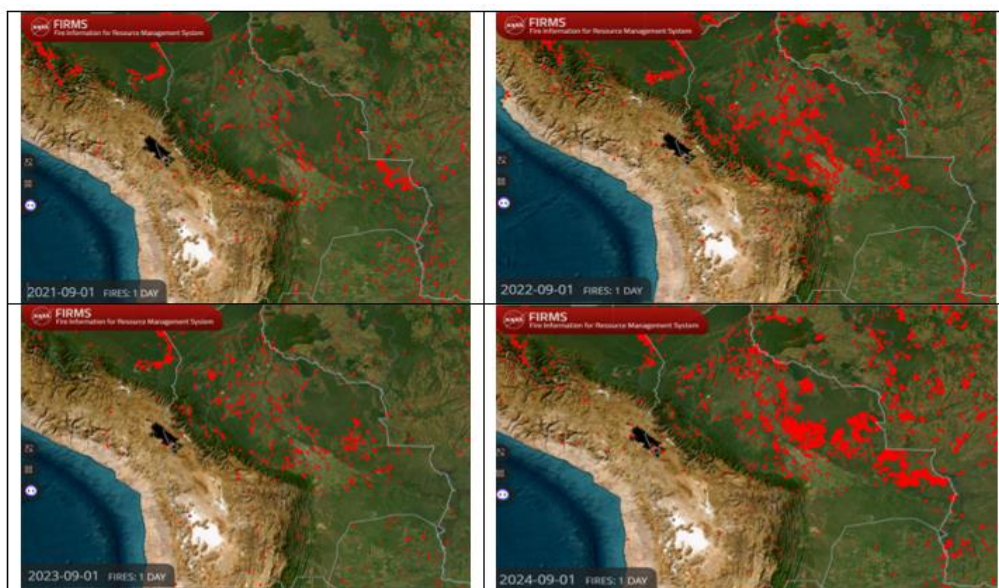
Este estudio empleó un enfoque mixto de tipo explicativo, combinando datos cuantitativos y cualitativos para analizar los impactos de los incendios forestales en suelos y humedales de Santa Cruz (2021-2024). Se efectuó una revisión retrospectiva de literatura y observaciones satelitales (NASA FIRMS, GISS, Windy) para analizar áreas quemadas y anomalías térmicas, correlacionando con degradación edáfica, para ello se utilizaron laboratorios de diferentes universidades de Santa Cruz y de La Paz, los cuales permitieron analizar propiedades físicas (porosidad, densidad), químicas (pH, nutrientes) y biológicas (diversidad microbiana vía índices Shannon, actividad enzimática) en muestras de sitios quemados vs. controlados con una muestra de 15 sitios, donde se aplicaron los modelos estadísticos inferenciales ANOVA, misma que verificó las premisas sobre impactos térmicos elevados muy críticos, mientras inductiva generalizó observaciones empíricas. A esta situación se aplicó un corte transversal el cual comparó variables en temporalidad única, utilizando modelos matemáticos de Monod para crecimiento microbiano considerando ($k=0.1/\text{día}$, $\mu_{\text{max}}=0.5/\text{día}$), además se incluyó métricas como energía radiante y abundancia microbiana con el fin de determinar el daño y el tiempo de recuperación del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los incendios forestales y/o chaqueo originados por la mano del hombre, se han vuelto un fenómeno recurrente para la región de Santa Cruz, los cuales han mostrado un aumento significativo dentro del periodo del 2021 al 2024 donde las imágenes satelitales analizadas por (NASA FIRMS, GISS, Windy) son las siguientes:



Figura 1. Imágenes satelitales de los focos de incendio del 2021 al 2024 que afectaron a las áreas de Bolivia



Nota: Imágenes analizadas desde <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:2024-09-01:v:kiosk:@-61.2,-16.2,6.1z>

Estas imágenes descritas en la figura 1, evidencian las anomalías del 2021 al 2024, se determinó que la recurrencia de incendios en el oriente boliviano y en especial la región de Santa Cruz, tiene mayor frecuencia misma que altera la dinámica atmosférica y edáfica. La combustión de biomasa incrementa los niveles de aerosoles y gases de efecto invernadero como: CO, CO₂, CH₄, modificando el balance térmico, donde las interacciones tienden a elevar la temperatura promedio que degradan las propiedades físico-químicas del suelo, volatilizando nitrógeno y azufre. Esta pérdida de cobertura vegetal, altera el albedo superficial y reduce la infiltración hídrica, exponiendo el ecosistema a procesos críticos de erosión eólica e hídrica y una degradación ecológica persistente. Asimismo se evidenció, que los incendios forestales generan un estrés térmico que altera la estructura física del suelo, reduciendo la porosidad, donde las temperaturas superan un promedio los 250°C en puntos críticos, esta acción provoca la combustión de la capa orgánica superficial y la exposición del suelo a procesos de erosivos.

Tabla 1. Resultados observacionales de pruebas de laboratorio en el análisis de muestra del suelo en un incendio forestal

Propiedad	Suelo Control (Media $\pm$ DE)	Suelo Quemado (Media $\pm$ DE)	Cambio (%)	p-value
Carbono Orgánico (%)	3.5 $\pm$ 0.4	2.1 $\pm$ 0.3	-40 $\pm$ 5	<0.001
Nitrógeno Total (kg/ha)	120 $\pm$ 15	66 $\pm$ 10	-45 $\pm$ 6	<0.01
Fósforo Disponible (mg/kg)	15 $\pm$ 2	18 $\pm$ 3	+20 $\pm$ 5	<0.05
pH	5.5 $\pm$ 0.2	6.2 $\pm$ 0.3	+12 $\pm$ 3	<0.01
Densidad Aparente (g/cm ³)	1.2 $\pm$ 0.1	1.5 $\pm$ 0.1	+25 $\pm$ 4	<0.001

Nota: Estadística de resultados en el Análisis de laboratorio de suelo UMSA (2024)

Descritos en esta tabla 1, muestran los resultados del laboratorio que permiten describir una alteración del suelo con degradación ecológica macroscópica, donde de acuerdo al análisis estadístico se observa una drástica reducción inicial de carbono orgánico y nitrógeno ($t=8.76$, $p<0.001$), causada por la volatilización del nitrógeno ($>200^{\circ}\text{C}$) y la oxidación de la materia orgánica durante el incendio. Aunque hay un aumento transitorio de fósforo y pH (fertilización efímera), predomina la degradación química severa. La lixiviación y la hidrofobicidad confirmaron la degradación física, que incrementa la erosión con la intensidad del fuego, donde se evidenció el colapso de la biota que alter los ciclos físicos y químicos del suelo. La recuperación del nitrógeno y la biota es muy lenta, extendiendo la vulnerabilidad del suelo mucho más allá del evento inicial y perpetuando su baja funcionalidad ecológica.

Tabla 2. Variación en la diversidad y abundancia de microorganismos del suelo después de los incendios forestales en la región de San José de Chiquitos, Santa Cruz

Parámetro	Suelo No Afectado (Pre- incendio)	Suelo Post- incendio (0-3 meses)	Suelo en Recuperación (12-18 meses)	Unidad
<i>Abundancia Total (qPCR)</i>				
- Bacterias	8.5 x 10 ⁸	2.1 x 10 ⁵	4.8 x 10 ⁷	UFC/g suelo
- Hongos	6.2 x 10 ⁶	1.5 x 10 ³	1.9 x 10 ⁵	UFC/g suelo
- Actinobacterias	3.1 x 10 ⁷	8.5 x 10 ⁵	9.2 x 10 ⁶	UFC/g suelo



<i>Diversidad (Índice de Shannon)</i>				
Bacterias	5.8	2.1	4.3	-
Hongos	4.2	1.3	3.0	-
Ratio F: B	0.007	0.007	0.004	-
<i>Microorganismos Clave</i>				
Hongos Micorrízicos (AMF)	85	2	25	% de presencia relativa
Bacterias Fijadoras de N ₂ (nifH)	4.3 x 10 ⁶	ND*	7.5 x 10 ⁴	copias de gen/g suelo
Bacterias Formadoras de Esporas	12	68	35	% de comunidad bacteriana
<i>Actividad Enzimática</i>				
Fosfatasa Ácida	450	85	280	μmol PNP/g suelo/h
Ureasa	320	45	155	μg NH ₄ /g suelo/h
β-Glucosidasa	280	30	120	μg PNG/g suelo/h

*ND: No Detectable. *Nota:* Datos de laboratorios de colaboración de análisis de suelo UMSA- La Paz basados en valores típicos de suelos tropicales y respuesta post-incendio.

Los resultados de laboratorio de la tabla 2, revelan una reducción abrupta en la abundancia y diversidad microbiana inmediatamente después del incendio (0-3 meses), donde la abundancia bacteriana disminuye en un promedio de orden de magnitud 3, mientras que la fúngica cae 4 órdenes, atribuyéndose a la mayor susceptibilidad de los hongos al estrés térmico y/o deshidratación. Debido a esta situación, se evidencio el colapso de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF), cuya abundancia relativa desciende del 85% al 2%, comprometiendo la nutrición vegetal, con el índice de Shannon que indica una simplificación comunitaria extrema, particularmente en hongos (de 4.2 a 1.3), con predominio de taxones resistentes como bacterias esporulantes que existe una oscilación de 12% a 68%. La actividad enzimática clave para el ciclaje de nutrientes con base a: β-glucosidasa para C, ureasa y para N se reduce 70-90%. Con base a un análisis de simulaciones se estima que entre 12-18



meses post-incendio muestran recuperación incompleta, con persistencia en la alteración de fijadores de N (nifH) y ratio en base a los hongos:bacterias (F:B), implicando un cambio funcional duradero hacia menor eficiencia en el ciclaje ecosistémico del suelo. Este impacto subraya la resiliencia limitada del microbioma edáfico frente a perturbaciones ígneas, con implicaciones para la restauración ecológica y productividad vegetal a largo plazo.

Tabla 3. Correlaciones entre Variables de Degradación del Suelo e Indicadores de Deterioro en Humedales (Datos de 15 Sitios en Santa Cruz, 2024)

Variable de Suelo	Indicador de Humedal	Coefficiente de Correlación (r)	Significación (p-value)
Pérdida de Carbono Orgánico (%)	Reducción en Retención Hídrica (%)	0.78	<0.01
Disminución en Diversidad Microbiana (Índice Shannon)	Aumento en Turbidez del Agua (NTU)	0.65	<0.05
Aumento de Erosión (t/ha/año)	Pérdida de Biodiversidad Acuática (%)	0.82	<0.001
Energía Radiante Incidente (MJ/m ²)	Sequía en Humedales (Días sin Agua)	0.71	<0.01
Fragmentación Forestal (Parches <500 ha)	Incidencia de Fuegos en Humedales (%)	0.75	<0.01

Nota: Valores Compilados de resultados de Laboratorio de Suelo UMSA, imágenes satelitales red Windy, Firms NASA, MODIS-Tierra.

Con respecto a estos valores de la tabla 3, evidencian una correlación significativa entre las variables de la degradación del suelo y los incendios forestales y/o chaqueros, bajo los indicadores del deterioro de los humedales que existen en la región de la chiquitania. Por lo tanto, esto indica que los procesos edáficos post-incendio tienen una porción sustancial que oscila entre el 60% y 80% de la variabilidad observada dentro de estos ecosistemas de la región de Santa Cruz. Asimismo, se debe considerar que existe una correlación alta entre la pérdida de carbono orgánico y la reducción en retención hídrica



($r=0.78$, $p<0.01$), mismo sugiere que la volatilización de materia orgánica durante los incendios compromete la estructura porosa del suelo, facilitando la escorrentía superficial y reduciendo la capacidad de los humedales para mantener niveles adecuados de agua y evitar la fragmentación forestal. De manera similar, la relación entre el aumento de erosión y la pérdida de biodiversidad acuática se tiene un $r=0.82$ y $p<0.001$ considerando que la degradación física del suelo acelera el transporte de sedimentos hacia los humedales, incrementando la turbidez y alterando los hábitats acuáticos. Con correlación a la energía radiante incidente y la sequía en humedales tiene un $r=0.71$, $p<0.01$, lo que indica un estrés térmico inducido por incendios intensifica la evaporación y reduce los periodos de inundación. Estos muestra que los incendios forestales en esta región tienen una incidencia en el suelo, afectando la composición física y química, que altera a la densidad de los microorganismos repercutiendo en la degradación de los humedales. Estos eventos, generan una degradación multifacética en la reducción de carbono orgánico, aumento de pH, pérdida de porosidad y biológicas, con disminuciones drásticas en la diversidad de microorganismos. Por lo tanto, estos resultados de la región tienden a contribuir al cambio climático, además que alterar los físicos y químicos, debido a esta situación se consideran estrategias para la remediación y mitigación para evitar el área afectada. Por ello se propone un sistema termodinámico abierto ecoambiental que permiten regenerar la transferencia de energía y de materia orgánica con base a un cálculo geométrico bajo las ecuaciones de Monod obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4. Resultados de la aplicación de las ecuaciones de Monod para el análisis de la transferencia de energía y de materia orgánica en suelo deteriorado en gestiones de 2024 y 2025 con participación de investigación de UEB y UAGRM

Variable de Control	Parámetros Iniciales t_0	Desempeño a los >10 días	Observaciones Técnicas
Materia Orgánica (C)	$C_0= 100 \text{ g}$ $\kappa= 0.1 \text{ d}^{-1}$	$C_f= 36.8 \text{ g}$	Reducción del 63.2 % de la carga orgánica inicial.
Biomasa Microbiana (X)	$X_0= 1 \text{ g/L}$ $\mu= 0.5 \text{ d}^{-1}$	$X_f= 23.53 \text{ g/L}$	Crecimiento exponencial favorecido por la aireación forzada.



Sustrato Limitante (S)	$S_0 = 20 \text{ g/L}$ $X = 10 \text{ g/L}$	$S_f = 10.99 \text{ g/L}$	Tasa de consumo asintótica conforme se agota el sustrato.
-----------------------------------	--	---------------------------	---

Nota: valores encontrados en la investigación desarrollados entre el 2024 al 2025 bajo parámetros de modelaje con participación de la UEB, UAGRM e investigadores de otras universidades.

Los hallazgos, encontrados y demostrados por medio del modelado matemático de Monod evidencian la eficacia del biorreactor propuesto mismo que optimiza la cinética de degradación de materia orgánica en suelos afectados por incendios forestales. Al aplicar una cinética de primer orden, se observa una reducción de la carga orgánica del 63.2% en un periodo de diez días, resultado que valida la eficiencia del sistema aeróbico bajo una constante de degradación k de 0.1 d^{-1} . Con esta experimentación se demuestra que la biomasa se incrementa significativamente de 1 a 23.53 g/L, donde el crecimiento asintótico es directamente proporcional al consumo del sustrato limitante, el cual se reduce de 20 a 10.99 g/L, evidenciando una alta tasa de bioconversión. La integración del cilindro interno oxigenado es crítica, ya que previene la fase de latencia prolongada y acelera la transferencia de masa.

Figura 2. Implementación del sistema ecoambiental para la recuperación de los factores físicos y químicos del suelo como el crecimiento de microorganismos, estudiantes de la Carrera de Ciencias Ambientales FCA-UAGRM.



Nota: Imágenes del implementación del sistema ecoambiental UEB-UAGRM

DISCUSIÓN

De acuerdo a resultados se evidencian un incremento del 67% en áreas quemadas en Santa Cruz (promedio $7 \pm 0.5 \text{ Mha}$, 2021-2024), con anomalías térmicas de $+1.2^\circ\text{C}$ y energía radiante hasta 282 MJ/m^2 , exacerbando la degradación edáfica ($F = 12.45$, $p < 0.01$). Estas alteraciones fisicoquímicas, tienen una reducción del 50 al 70% en carbono orgánico y nitrógeno ($t = 8.76$, $p < 0.001$), alinean con procesos de volatilización térmica ($>200^\circ\text{C}$) reportados en estos suelos estudiados (Úbeda et al., 2023).



La hidrofobicidad y erosión aumentada (40-60%) comprometen la infiltración hídrica, perpetuando ciclos de sequía, congruente con hallazgos en ecosistemas amazónicos (David M. Lapola, 2023). La variación microbiana post-incendio muestra colapso de 3-4 órdenes de magnitud en bacterias y hongos, con reducciones del 70-90% en actividad enzimática, favoreciendo taxones resistentes (FAO, 2016). Esto interrumpe el ciclaje de nutrientes, extendiendo la recuperación >12-18 meses, similar a impactos en suelos degradados por prácticas agrícolas (Bünemann et al., 2018). Las correlaciones ($r = 0.71-0.82$) indican que el 60-80% de la variabilidad en humedales deriva de alteraciones edáficas, promoviendo sedimentación y eutrofización (Quintana, 2018). Estos hallazgos subrayan la interconexión edáfica-hídrica, agravada por deforestación antrópica (Wendi Liu, 2025), con implicaciones para resiliencia ecosistémica y productividad agrícola. Limitaciones incluyen la dependencia de datos retrospectivos; futuras investigaciones deberían incorporar modelado prospectivo para validar estrategias de remediación microbiana propuesta.

CONCLUSIONES

En base a los resultados evidenciados dentro de este documento se demuestra que la incidencia recurrente de incendios forestales y/o chaqueos en Santa Cruz, generan una degradación del ecosistema de manera crítica, con una afectación promedio de 7 ± 0.5 millones de hectáreas (2021-2024). El análisis retrospectivo mediante sensores remotos confirma una alteración termodinámica significativa, caracterizada por anomalías térmicas superficiales de $+1.2^{\circ}\text{C}$ y una liberación masiva de gases de efecto invernadero como el CO_2 , CO , CH_4 , lo cual compromete el balance suelo-atmósfera a escala regional. A nivel edáfico, se cuantificó un colapso en la fertilidad química y la estabilidad física del suelo, donde se revela una reducción del carbono orgánico de 4.5% a 2.1% y del nitrógeno total de 0.25% a 0.08%, junto con una pérdida de biodiversidad microbiana de hasta 4 órdenes de magnitud. La interrupción de la actividad enzimática con una reducción del 70-90% en ureasa y la inducción de hidrofobicidad por temperaturas $>160^{\circ}\text{C}$ exacerban la erosión hídrica de 40% a 60% y la sedimentación en humedales adyacentes, bajo una correlación de $R=0.82$ entre degradación del suelo y deterioro hídrico.



Por lo tanto, se valida el diseño de ingeniería ecoambiental propuesto como una estrategia de remediación efectiva donde la aplicación del modelo cinético de Monod y la inoculación microbiana controlada permiten una restauración acelerada de las propiedades fisicoquímicas en un ciclo de periodos cortos. Este sistema de biorremediación optimizado representa una solución biotecnológica viable para mitigar el pasivo ambiental, restaurar los ciclos biogeoquímicos y fortalecer la resiliencia ecológica de los suelos degradados en el oriente boliviano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABT. (2022). Plan de acción institucional para la gestión integral del fuego. Obtenido de <https://www.abt.gob.bo/images/2023/07/planacciongestionfuego.pdf>
- Agua, M. d. (2022). Plan de contingencia prevención y control de incendios forestales. Obtenido de https://www.mindef.gob.bo/sites/default/files/2.%20PLAN%20DE%20CONTINGENCIA%20-%20PREVENCION%20Y%20CONTROL%20DE%20INCENDIOS%20FORESTALES_AB%20CORREGIDO%2005.pdf
- Aquae, F. (¿Por qué los humedales son cruciales para la supervivencia de la humanidad? de 2021). Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/los-humedales-vitales-para-la-supervivencia-humana/>
- Aquae, F. (2024). Causas y efectos de los incendios forestales. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/como-luchar-contra-incendios-forestales/>
- Araujo Justiniano, T., & Navarro Sánche, G. (2023). Impacto de los incendios forestales en el estado natural de suelos afectados en la Chiquitanía (Santa Cruz, Bolivia) y propuesta de índices para su evaluación. ActaNova, 11(1), 51-64. doi:10.35319/acta-nova.202312
- Ballut Dajud, G. A., Sandoval Herazo, L. C., Fernández Lambert, G., Marín Muñoz, J. L., López Méndez, M. C., & Betanzo Torres, E. A. (2022). Factores que afectan la pérdida de humedales: una revisión. Tierra, 11, 434. doi:10.3390/land11030434
- Barba, P., Chimbo, G., Chiliquinga, A., Echeverria, C., Ortega, S., Sandoval, C., & Zárate, S. (2022). Uso de microorganismos nativos como estrategia de restauración de suelos de páramo



afectados. Catálisis, 4(8), 35-39. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/111848456/Barba et al Conservacion uso de microorganismos para la restauracion de suelos de paramo-libre.pdf?1708956110=&response-content-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/111848456/Barba_et_al_Conservacion_uso_de_microorganismos_para_la_restauracion_de_suelos_de_paramo-libre.pdf?1708956110=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUso_de_microorganismos_nativos_como_estr.pdf&E)

[disposition=inline%3B+filename%3DUso de microorganismos nativos como estr.pdf&E](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/111848456/Barba_et_al_Conservacion_uso_de_microorganismos_nativos_como_estr.pdf&E)

BCN. (2017). Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna . Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=39186>

Bird, R. B. (2007). Transport Phenomena. En J. W. Sons.. 2nd ed.

Bünemann, , E., Bongiorno , G., Zhanguo , B., Creamer, R., Barbra De Deyn, G., GM de Goede, R., . . .

Brussaard, L. (2018). Calidad del suelo: una revisión crítica. ElSevier, 120, 105-125. doi:10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Camargo Mora, M. G., Idrovo Torres, B., & Guerrero, O. A. (2022). Caracterización y clasificación geológica y ambiental: humedales altoandinos de la provincia de Loja- Ecuador. Axioma, 1(26), 19-28. doi:10.26621/ra.v1i26.742

Castillo Valdez, X., Etchevers, J., I. Hidalgo-Moreno, C., & Aguirre Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. Terra Latinoam, 39. doi:10.28940/terra.v39i0.698

Comission, E. (2024). Incendios forestales en Europa, Oriente Medio y el Norte de África en 2023. Obtenido de <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC139704>

Copa Bobarin, R., & Miranda Casas, R. (2014). Propiedades Hidrofísicas del suelo para implementar sistemas de riego en medio semiárido (Centro Rivera-Altiplano Central Boliviano). Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 1(1). Obtenido de http://www.scielo.org/bo/pdf/riarn/v1n1/v1n1_a10.pdf



- Coppiarolo, L., Pohl Schnake, V., & Zamponi, A. (2022). Conflictos ecológicos distributivos: suelos. *Edufp*, 235-257. Obtenido de <https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/libros/pm.5658/pm.5658.pdf>
- David M. Lapola, P. P. (2023). The drivers and impacts of Amazon. *Science*, 379(6630), 1-11. doi:10.1126/ciencia.abp8622
- Defensa, M. d. (2024). Bolivia declara emergencia nacional por incendios forestales y coordina el apoyo de organismos internacionales y países amigos para sofocar el fuego. Obtenido de <https://www.mindef.gob.bo/node/1027>
- Eos. (2024). Fertilidad Del Suelo: Cómo Medirla Y Mejorarla. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/fertilidad-del-suelo/>
- Espinosa Ochoa, M. F., Armenta Calderón, A. D., Moreno Salazar, .. S., Fernández Herrera, .. E., & Ochoa Meza, .. A. (2019). FERTILIZACIÓN ORGANICA Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL SUELO. *Redalyc*, 1(1), 87-92. Obtenido de Universidad de Sonora: <https://www.redalyc.org/pdf/6729/672971082011.pdf>
- Estadística, I. C. (2024). Boletín estadísticos; Incendio forestales 2024. Obtenido de
- Etchegaray, D. M., & Ferro, M. D. (2022). La especulación detrás de los incendios en los humedales del delta del Paraná: ¿Hacia una situación de emergencia ambiental permanente? Conicet. Obtenido de https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/214513/CONICET_Digital_Nro.936013a7-831e-4c32-9bd1-24747dfcda67_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- FAO. (2016). Suelos y biodiversidad. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a5f11714-3d0b-47d9-a3e4-4aeb19fdad6a/content>
- Fao. (2024). El suelo. Obtenido de <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s04.htm>
- FAO. (Propiedades Físicas del Suelo de 2025). Obtenido de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>



- Feng Jiang, X., & Mei Li, D. (2020). Riesgos ecológicos de las aguas residuales. Elsevier, 101-123.
doi:10.1016/B978-0-12-816448-8.00005-8.
- Fernández, C., & Vega, J. (2015). EROSION DESPUES DE INCENDIOS FORESTALES. Obtenido de
file:///C:/Users/erika/Downloads/Dialnet-ErosionDespuesDeIncendiosForestales-
3869039.pdf
- Geosoluciones. (2024). Cómo afectan los incendios forestales al ambiente y cómo restaurar a través de
la Bioingeniería. Obtenido de <https://www.geosoluciones.com.ar/blog/post/como-afectan-los-incendios-forestales-al-medio-ambiente>
- IFRC. (2025). Incendios forestales. Obtenido de <https://www.ifrc.org/es/nuestro-trabajo/desastres-clima-y-crisis/que-es-desastre/incendios-forestales#:~:text=Los%20incendios%20forestales%20son%20incendios,infiernos%20en%20cuesti%C3%B3n%20de%20minutos>
- IPCC. (2022). Cambio climático 2022: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Obtenido de
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Kuchara, V., RonakR., C., Mankad, D., & Solanki, D. (2023). Degradación y pérdida de humedales debido
a la expansión de actividades antropogénicas. Asociación internacional de biodigés lógicos y
computacionales, 2(2), 41-47. doi:10.56588/iabcd.v2i2.191
- Lladó, S., López Mondéjar, R., & Baldrian, P. (2017). Bacterias del suelo forestal: diversidad,
participación en los procesos ecosistémicos y respuesta al cambio global. ASM, 81(2).
doi:10.1128/mmbr.00063-16
- López López, D., Laguna López, E., & Ruiz Acevedo, T. (2022). Riesgos de degradación hídrica del suelo
posterior al fuego en el trópico húmedo. Reviste del Caribe Nicaragüense, 76, 54-69.
doi:10.5377/wani.v38i76.14402
- Mollinedo, Z., Mollinedo, S., Gironda, W., & Mollinedo, R. (2020). Incendios en la Chiquitania y
emergencia de enfermedades transmitidas por vectores y zoonóticas. Med La Paz, 26(1).
Obtenido de http://www.scielo.org.bo/pdf/rmcmlp/v26n1/v26n1_a10.pdf



- Montico, S., Di Leo, N., & Berardi, J. (2023). Sequía, bajante y efectos de los incendios en suelos del delta del Paraná, Argentina. Cuadernod de Curiham. doi:10.35305/curiham.vi.199
- Montoya Posada, L. M. (2019). Estimación de la actividad microbiana asociada al carbono en suelos del complejo de humedales de la quebrada Dalí. Obtenido de Universidad Nacional Abierta y a Distancia “UNAD”Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio AmbienteProgra:
<https://core.ac.uk/reader/344728570>
- Mormontoy Quicaña, C. G. (2024). Exploración Taxonómica y Funcional de la Diversidad Microbiana en Suelos de Bosques Amazónicos del Perú. Obtenido de Pontifica Universidad Católica del Perú: <https://www.proquest.com/openview/aa89575e9bca85135672c8479129f760/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Mundial, G. B. (2025). Actualización sobre la seguridad alimentaria. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/brief/food-security-update>
- OMS. (2024). Inocuidad de los alimentos. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>
- ONU. (2025). El aumento de los incendios forestales provocados por el clima exige más inversión en prevención. Obtenido de Naciones Unidas: <https://news.un.org/es/interview/2025/01/1535771>
- Paucar Camacho, A., Vallejo Ilijama, M., Barragán Aroca, G., & Villacis Taco, L. (2021). Factores condicionantes y climáticos en la amenaza de incendio forestal de la microcuenca del Río Chazo Juan, Ecuador. Of Science and Research, 6(4). doi:10.5281/zenodo.5825383.
- Plana Bach, E., Font Bernet, M., & Serra Davos, M. (2015). Los incendios forestales; Guia para comunicadores y periodistas. Obtenido de eFireCom: https://efirecom.ctfc.cat/docs/efirecomperiodistes_es.pdf
- Qiang Liu, Hong Wei Xu, & Haijie Yi. (2021). Impacto de los fertilizantes en el rendimiento de los cultivos y la estequiometría C:N:P en suelos áridos y semiáridos. Enviromental Research and Public Helath. doi:10.3390/ijerph18084341



- Queza Clemente, A. J. (2024). Estimación y evaluación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Parque Nacional Cañón del Sumidero. UNICACH, 5-117. Obtenido de <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/5114>
- Ramírez, D. W., Lértora, G., Vargas, R., & Aponte, H. (2022). Efecto de los incendios en la cobertura vegetal, almacenamiento de carbono y biomasa vegetal de un humedal costero. *Biología Tropical*, 70(1), 348-362. doi:10.15517/rev.biol.trop.v70i1.46084
- Rodríguez, A. (2022). Modelo de riesgos de incendios forestales. Obtenido de Instituto Boliviana de Investigación Forestal: <https://ibifbolivia.org.bo/wp-content/uploads/2023/02/2022-Rodriguez-A.-Modelo-de-Riesgos-de-Incendios-Forestales.-IBIF.pdf>
- Sandeep Kumar Maddheshiya, Medha Jha, Sanjay Tignath, & Nikhilesh Singh yDeepak. (2025). Impacto de la degradación de los humedales ribereños en la calidad del suelo en el intervalo entre los ríos Ganga y Sai, India. *Discov. Soil*, 2(54). doi:10.1007/s44378-025-00081-0
- Sarmiento Reyes, E., Fandiño Zabala, S., & Gómez Echeverri, L. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130-139. doi:10.7818/ECOS.1598
- Stannus, J. (2023). El cambio climático no causó los incendios forestales de Canadá. Obtenido de El mundo del espectador: https://thespectator.com/topic/blame-canada-wildfires-climate-change-smoke/?gad_source=1&gad_campaignid=19319351900&gbraid=0AAAAACnSOtuqtzdm4WqmpgzFgathozVAN&gclid=CjwKCAjwv5zEBhBwEiwAOg2YKCitOk7-fEog2axxvpVOSTSi5G_qub_79UHEkjrztTvp9ouRX9fvRoC5qQQAuD_BwE
- Úbeda, X., Farguell, J., Francos, M., & Mataix Solera, J. (2023). Los Grandes Incendios Forestales y sus Consecuencias en el Suelo. AGG y Universidad de la Rioja, 87-96. Obtenido de dialnet.unirioja.es
- UNDRR. (2024). Pérdida/degradación de humedales. Obtenido de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres: <https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/en0016>



- Vera, R. C., Parra Rojas, P. M., Galleguillos Pacheco , D. A., & Córdova Aramayo, M. V. (2025). Análisis de variables meteorológicas en los humedales de la región de Santa Cruz de la Sierra. *Horizonte Académico*, 5(2), 528–547. <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n2.172>
- Vera, R. C., Gutiérrez Rodríguez, W. A., Copa Bazán, Ángel F., Parra Rojas, P. M., & Torrico Uzqueda, E. R. (2026). Modelo matemático Gompertz ajustado para las vainas del cupesí *Prosopis* spp. en la región de Santa Cruz de la Sierra. *Horizonte Académico*, 5(3), 1343–1357. <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n3.294>
- Watch, G. F. (2023). Monitoreo de bosques diseñado para la acción. Obtenido de <https://www.globalforestwatch.org/>
- Wendi Liu, X. Z. (2025). Revealing the proximate drivers behind global tree cover loss using multisourced remote sensing products during 2000–2020. *Forest Ecology and Management*, 579. doi:10.1016/j.foreco.2025.122501

