

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v9i17.0322>

ALTERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO POR INCENDIOS FORESTALES, EN FUNCIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA, ECUADOR

SOIL QUALITY ALTERATION DUE TO FOREST FIRES, AS A FUNCTION OF CLIMATE CHANGE IN THE PROVINCE OF PICHINCHA, ECUADOR

Quishpe-Sánchez Jennifer Abigail ¹; Agreda-Oña Jose Luis ²

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Extensión Salache. Latacunga, Ecuador. Correo: jennifer.quishpe0135@utc.edu.ec.

² Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Extensión Salache. Latacunga, Ecuador. Correo: jose.agreda2101@utc.edu.ec.

Resumen

Los incendios forestales constituyen uno de los principales factores de alteración de los ecosistemas andinos, afectando de manera directa las propiedades físicas y químicas del suelo. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la severidad del incendio sobre la calidad del suelo mediante el análisis integrado de información satelital y variables edáficas en un área afectada por incendios forestales ocurridos durante la época de sequía (septiembre–octubre de 2024) en la provincia de Pichincha, Ecuador. La severidad del incendio se determinó a partir del Índice Normalizado de Área Quemada (NBR) y su variación temporal (dNBR), empleando imágenes satelitales pre y post-incendio de la NASA, siguiendo los lineamientos metodológicos propuestos por USGS y UN-SPIDER. Con base en esta clasificación, se establecieron siete niveles de severidad. Se recolectaron 62 muestras de suelo, conforme a los criterios establecidos en el Acuerdo Ministerial 097A, las cuales fueron analizadas en laboratorio para un total de 21 variables analíticas, priorizando nueve variables clave: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno, potasio, textura, calcio, azufre y fósforo. Los resultados evidencian que los incendios de alta severidad generan una disminución significativa de nutrientes esenciales, alteraciones en la textura del suelo y cambios en el equilibrio químico, mientras que los suelos sin quemar y aquellos afectados por incendios de baja severidad mantienen condiciones edáficas más estables. Se concluye que la severidad del fuego controla de manera determinante la dinámica físico-química del suelo, influyendo directamente en su fertilidad, estabilidad y capacidad de recuperación ecológica. Estos resultados resaltan la importancia de incorporar la severidad del incendio como criterio fundamental en estrategias de manejo, restauración y planificación ambiental en escenarios de incremento de incendios asociados al cambio climático.

Palabras clave: Suelo, incendio, cambio climático, sequía.

Abstract

Forest fires are one of the main factors altering Andean ecosystems, directly affecting the physical and chemical properties of the soil. This study aimed to evaluate the effect of fire severity on soil quality through the integrated analysis of satellite data and soil variables in an area affected by forest fires during the dry season (September–October 2024) in the province of Pichincha, Ecuador. Fire severity was determined using the Normalized Burn Rate (NBR) and its temporal variation (dNBR), employing pre- and post-fire satellite imagery from NASA, following the methodological guidelines proposed by the USGS and UN-SPIDER. Based on this classification, seven severity levels were established. Sixty-two soil samples were collected, according to the criteria established in Ministerial Agreement 097A. These samples were analyzed in the laboratory for a total of 21 analytical variables, prioritizing nine key variables: pH, electrical conductivity, organic matter, nitrogen, potassium, texture, calcium, sulfur, and phosphorus. The

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 13 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025.

Fecha de publicación: 12 de enero de 2026.



results show that high-severity fires generate a significant decrease in essential nutrients, alterations in soil texture, and changes in chemical equilibrium, while unburned soils and those affected by low-severity fires maintain more stable soil conditions. It is concluded that fire severity decisively controls the physicochemical dynamics of the soil, directly influencing its fertility, stability, and ecological recovery capacity. These results highlight the importance of incorporating fire severity as a fundamental criterion in management, restoration, and environmental planning strategies in scenarios of increased fires associated with climate change.

Keywords: Soil, fire, climate change, drought.

1. Introducción

Los incendios forestales se han convertido en una de las perturbaciones más relevantes a escala mundial, impactando entre 330 y 431 millones de hectáreas de vegetación anualmente (Nolan et al., 2022). Estos eventos liberan grandes volúmenes de carbono acumulado en la biomasa y en el suelo, intensificando el cambio climático (Longbottom et al., 2022). Además, el fuego altera procesos ecológicos clave como el ciclo de nutrientes, la estructura edáfica y la capacidad de almacenamiento hídrico (Ramos-Rodríguez et al., 2024). Estos impactos son particularmente críticos en ecosistemas de montaña, donde el suelo es el principal reservorio de carbono y nutrientes.

En América Latina, los incendios han sido vinculados a la pérdida de cobertura vegetal, erosión y

disminución de fertilidad (Arias-Muñoz et al., 2024). Los incendios forestales, aunque forman parte natural de algunos ecosistemas, generan impactos ecológicos, sociales y económicos significativos en los países afectados (Garnica, 2021). Las consecuencias económicas de estos eventos son considerables, con pérdidas que superan los 50 millones de dólares anuales, además de comprometer la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica, la fertilidad del suelo y la estabilidad ambiental de las zonas andinas (Clavijo et al., 2025).

Los incendios forestales han afectado a varias provincias del Ecuador, especialmente zonas de transición agrícola-forestal (Reyes-Bueno & Balcazar-Gallegos, 2021). Se evidencia una alta recurrencia de incendios forestales en Ecuador vinculada a la presión antrópica y a condiciones de vulnerabilidad

climática (Vaca et al., 2024). Estos eventos afectan de manera particular a ecosistemas estratégicos (Gajendiran et al., 2024), donde el fuego provoca la pérdida de cobertura vegetal, la reducción de la capacidad de retención hídrica y la degradación de los agregados edáficos, comprometiendo el equilibrio ecológico y la provisión de servicios ambientales esenciales del país (Ramírez et al., 2022).

El fuego afecta propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como la pérdida de materia orgánica, el aumento temporal del pH y la liberación de cationes básicos (Arunrat et al., 2024). En zonas andinas, estudios muestran acidificación superficial, disminución del nitrógeno total (hasta 85%) y reducción de fósforo disponible tras incendios severos (Fuentes-Ramírez et al., 2022). Asimismo, investigaciones que se asemejan a las características del área de estudio en Galicia y España revelan que la severidad del fuego incrementa la repelencia al agua y la erosionabilidad del suelo, generando escorrentías y pérdida de horizontes fértiles (Lucas-Borja et al., 2022). Estos cambios comprometen la

fertilidad y la recuperación ecológica post-incendio.

Los incendios forestales hoy en día reflejan el impacto del cambio climático alrededor de todo el mundo (Abbass et al., 2022), las altas temperaturas y sequías prolongadas aumentan su ocurrencia de tal forma que, mientras que liberan carbono en cada incendio a su vez reducen la capacidad de retención del mismo en el suelo (Ma et al., 2024). Estos eventos modifican la estructura, distribución y funcionamiento de los ecosistemas, favoreciendo algunas especies y amenazando a otras, lo que compromete la estabilidad ecológica y la regeneración natural. La investigación se centra en los cambios físicos y químicos del suelo tras un incendio, con el fin de generar información para la recuperación de los ecosistemas afectados (Scheiner, 2024).

En síntesis, el presente estudio se orientó a responder tres preguntas principales: ¿cómo los incendios forestales alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en la provincia de Pichincha?, ¿qué diferencias significativas existen entre suelos afectados y no

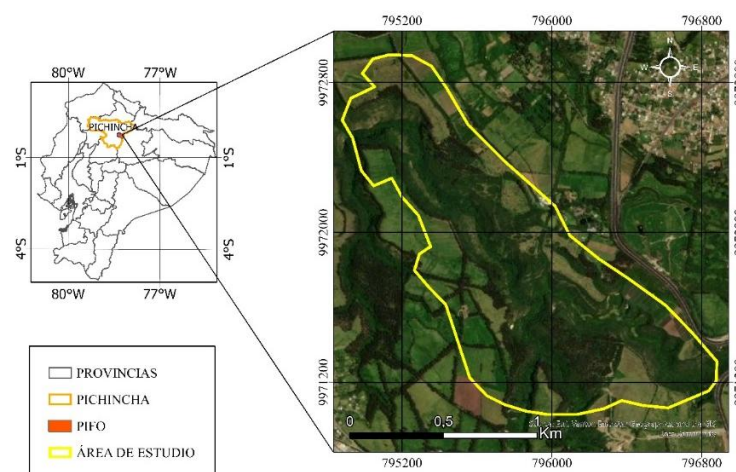
afectados?, y ¿qué variables explican mejor el grado de degradación postincendio? de acuerdo con investigaciones previas (Carrión-Paladines et al., 2022a), se planteó la hipótesis de que el fuego modifica de forma significativa la estructura y fertilidad del suelo, reduciendo su contenido de materia orgánica y nutrientes esenciales (Wuyep, Department of Geography, Environmental Management and Energy Studies, University of Johannesburg, Johannesburg, South Africa, et al., 2024). Siguiendo estos planteamientos, se evaluaron parámetros físicos y químicos mediante análisis de laboratorio y herramientas estadísticas multivariadas, con el fin de generar evidencia científica local que oriente estrategias efectivas de restauración ecológica (Porras Maturan, 2021).

2. Metodología

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en los Andes del norte de Ecuador en la provincia de Pichincha, parroquia Pifo, sector Itulcachi. Esta zona tiene un área de 102,5 hectáreas y se encuentra entre 2700 y 3000 msnm, correspondiente a una transición agrícola-forestal con antecedentes de incendios recurrentes los últimos dos años (2023 y 2024), durante este periodo se consumieron 10ha de bosque primario, 41ha de matorrales secos, 3 bienes privados y 52 animales de granja muertos, fue necesario 41 descargas de 1000 litros por la FFAA y 37 descargas de 450 litros por el cuerpo de bomberos de Quito según la Secretaria Nacional De Gestión De Riegos De La Republica Del Ecuador.

Mapa 1. Área de estudio



La Elaboración Del Mapa del área de estudio se realizó considerando las condiciones climáticas bajo las cuales ocurrieron los incendios forestales. Estos eventos se presentaron durante la época de sequía, específicamente en los meses de septiembre y octubre de 2024, periodo caracterizado por una marcada reducción de precipitación y altas temperaturas, factores que aumentan significativamente la intensidad y propagación del fuego en ecosistemas andinos, la zona ha sido escogida puesto que la mayoría de los incendios forestales en Ecuador ocurren en la Sierra (Pazmiño, 2019). El clima es templado-frío con temperatura media anual de 12–15 °C y precipitación de 800–1.200 mm (Ilbay-Yupa et al., 2021). Los suelos predominantes son Andosoles de origen volcánico, textura franco-arcillosa, pH ligeramente ácido y alto contenido de materia orgánica, condiciones que los hacen muy sensibles a la pérdida de fertilidad post-incendio (Arifin et al., 2022).

Determinación del grado de afectación

El índice normalizado de área quemada (NBR) y su variación temporal (dNBR) fueron utilizados para evaluar la severidad del incendio en el área de estudio, basándose en conjuntos de datos satelitales pre-incendio y post-incendio. Estas imágenes fueron obtenidas de los sensores ópticos de la NASA, procesadas de acuerdo con las prácticas recomendadas por UN-SPIDER para la evaluación de zonas afectadas por fuego. El NBR se fundamenta en la conversión de información espectral en índices normalizados, utilizando registros de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), los cuales responden de manera sensible a la pérdida de vegetación y a la exposición de material mineral posterior al fuego (Alcaras et al., 2022).

El NBR es un índice flexible para estimar el grado de quemado en distintas condiciones de cobertura vegetal, permitiendo evaluar tanto afectaciones de corta como de larga duración para aplicaciones ecológicas, de restauración y de

monitoreo ambiental (Alcaras et al., 2025). Este índice se calcula ajustando una transformación normalizada a la diferencia de reflectancias entre bandas NIR y SWIR, de acuerdo con la escala temporal de interés (antes y después del incendio), según la Ecuación 1.

$$NBR = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})}$$

Una vez obtenidos los valores de NBR para ambos momentos, se calculó el índice diferencial dNBR, que cuantifica el nivel de afectación mediante la ecuación 2.

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

Una vez determinados los valores espaciales del dNBR, se evaluó la severidad del incendio utilizando la tabla 1 de clasificación propuesta por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y adoptada por UN-SPIDER, la cual define categorías de afectación que van desde zonas no quemadas hasta áreas de alta severidad. Esta clasificación permitió identificar variaciones significativas en el impacto del incendio ocurrido durante la época de sequía (septiembre–octubre 2024), diferenciando patrones de daño térmico y niveles de alteración del suelo.

Tabla 1. Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del dNBR, propuesto por USGS.

Color	Nivel de severidad	Rango dNBR (escalado $\times 10^3$)	Rango dNBR (no escalado)
	Regeneración mejorada alta (post-incendio)	-500 a -251	-0.500 a -0.251
	Regeneración mejorada baja (post-incendio)	-250 a -101	-0.250 a -0.101
	No quemado	-100 a +99	-0.100 a +0.099
	Baja severidad	+100 a +269	+0.100 a +0.269
	Severidad moderada-baja	+270 a +439	+0.270 a +0.439
	Severidad moderada-alta	+440 a +659	+0.440 a +0.659
	Alta severidad	+660 a +1300	+0.660 a +1.300

Diseño del muestreo

Para delimitar espacialmente la zona afectada y ubicar de forma precisa los puntos de muestreo, se desarrolló una grilla sistemática regular dentro del polígono quemado (Henao et al., 2001). Este procedimiento permitió garantizar una cobertura homogénea del terreno y facilitó el análisis comparativo entre condiciones preincendio y postincendio

El dimensionamiento de la grilla se realizó en función del área, cada punto de muestreo representó una superficie aproximada de 23.716 m² (2,37 ha). Dado que las celdas se diseñaron como unidades cuadradas, se calculó la longitud de cada lado mediante la raíz cuadrada del área de la celda, obteniendo un tamaño de 154 m × 154 m por celda. Este dimensionamiento garantiza una resolución adecuada para captar variaciones edáficas significativas en ambientes de montaña afectados por incendios de alta intensidad.

Muestra

Se trabajó con un total de 62 muestras de suelo, número

determinado conforme al Acuerdo Ministerial N.º 097-A del MAATE, específicamente el apartado 4.5.2, que establece el cálculo del número mínimo de muestras (Y) en función del área del polígono de estudio (X, en hectáreas) mediante la fórmula y la Tabla 3 del reglamento.

$$Y = (X)^{0.3} \times (11.71) \text{ EC.1}$$

La toma de muestras se realizó siguiendo el instructivo de AGROCALIDAD (2020) donde cada punto fue georreferenciado con GPS y muestreado a una profundidad estándar de 20 cm, correspondiente al horizonte más afectado por incendios. El muestreo se efectuó mediante un barreno tipo Edelman, desinfectado entre puntos con etanol al 70% para evitar contaminación cruzada. En cada sitio se extrajo 1 kg de suelo, evitando bordes de caminos, zonas compactadas o acumulaciones anómalas de ceniza, asegurando que las muestras fueran representativas de cada nivel de severidad.

Cada una de las 62 muestras fue codificada con un identificador alfanumérico que incluyó el número de muestra, coordenadas y categoría de severidad (alta,

moderada, baja o testigo). Se registraron también observaciones adicionales como color del suelo, presencia de ceniza y estado de la cobertura vegetal. Posteriormente, todas las muestras fueron almacenadas a 4 °C, transportadas en contenedores isotérmicos y entregadas bajo cadena de custodia al laboratorio para su respectivo análisis físico-químico.

Análisis físico – químico

Las muestras de suelo se procesaron siguiendo protocolos normalizados de calidad analítica donde cada muestra se seca al aire ambiente, se tamiza a través de una malla de 2 mm de diámetro y se homogeniza para obtener una fracción representativa destinada al análisis físico-químico de acuerdo con lo descrito en el instructivo de muestreo para análisis de suelo de Agrocalidad.

El pH del suelo se midió en una suspensión suelo-agua (1:2) (Mosley et al., 2024). El nitrógeno total (N) se determinó mediante el método Kjeldahl (Lopez Choque et al., 2023) El fósforo disponible (P) se analizó con el método de Olsen (Ibrahim et al., 2021). Los cationes

intercambiables (K, Ca, Mg) se extrajeron con acetato de amonio 1N (pH 7) y se cuantificaron por absorción atómica (Preciado-Guzmán et al., 2024). El azufre (S) se determinó como sulfato extraíble mediante lectura turbidimétrica (Belcher et al., 2022). Los micronutrientes (Fe, Cu, Mn, Zn) se extrajeron con DTPA (0,005 M, pH 7,3) y se analizaron por absorción atómica, determinando su fracción biodisponible dependiente del pH y la materia orgánica (Peñaloza et al., 2023). El boro (B) se cuantificó con el método colorimétrico de azometina-H tras extracción con agua caliente (Ortiz et al., 2021). La suma de bases se calculó como la sumatoria de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+} , expresada en $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Liu et al., 2025). La materia orgánica (MO) se estimó por pérdida por ignición (LOI) a 550 °C (Santisteban et al., 2004).y la textura del suelo se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, clasificando las fracciones de arena, limo y arcilla según el triángulo textural del USDA utilizado por (Mwendwa, 2022), para evaluar la capacidad de retención hídrica y la susceptibilidad a la erosión.

Análisis estadístico

Para ello, se analizaron 62 muestras individuales distribuidas en cuatro bloques experimentales, considerando 17 variables analíticas (pH, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn, B, suma de bases, materia orgánica, textura y conductividad eléctrica).

Los datos se sometieron a una evaluación exploratoria inicial y a pruebas de normalidad como la de Shapiro–Wilk según cuya fórmula es:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad Ec.2$$

y la prueba de homogeneidad de varianzas Levene mediante la fórmula

$$Z_{ij} = |y_{ij} - \bar{y}_i| \quad Ec.3$$

utilizada en varios estudios para determinar el tipo de análisis apropiado (Gastwirth et al., 2009).

Cuando ambos supuestos se cumplieron ($p > 0.05$), se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías, considerando como factores el tratamiento (suelos quemados y control) y la severidad del fuego (alta, moderada, baja y sin afectación). La estadística F para cada factor se calculó mediante:

$$F = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}} = \frac{SS_{factor}/gl_{factor}}{SS_{error}/gl_{error}} \quad Ec.4$$

donde SS y gl son las sumas de cuadrados y grados de libertad asociados a cada fuente de variación (Pérez et al., 2019). El modelo general del ANOVA de dos vías se expresó como:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad Ec.5$$

donde μ es la media general, α_i el efecto del tratamiento, β_j el efecto de la severidad del fuego, $(\alpha\beta)_{ij}$ la interacción entre ambos factores y ϵ_{ijk} el error aleatorio, asumido normalmente distribuido.

Finalmente, para identificar diferencias significativas entre medias se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), cuya diferencia mínima significativa se calcula según la fórmula propuesta ya utilizada en otros estudios (Nanda et al., 2021):

$$HSD = q_{\alpha, k, gl_e} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad Ec.6$$

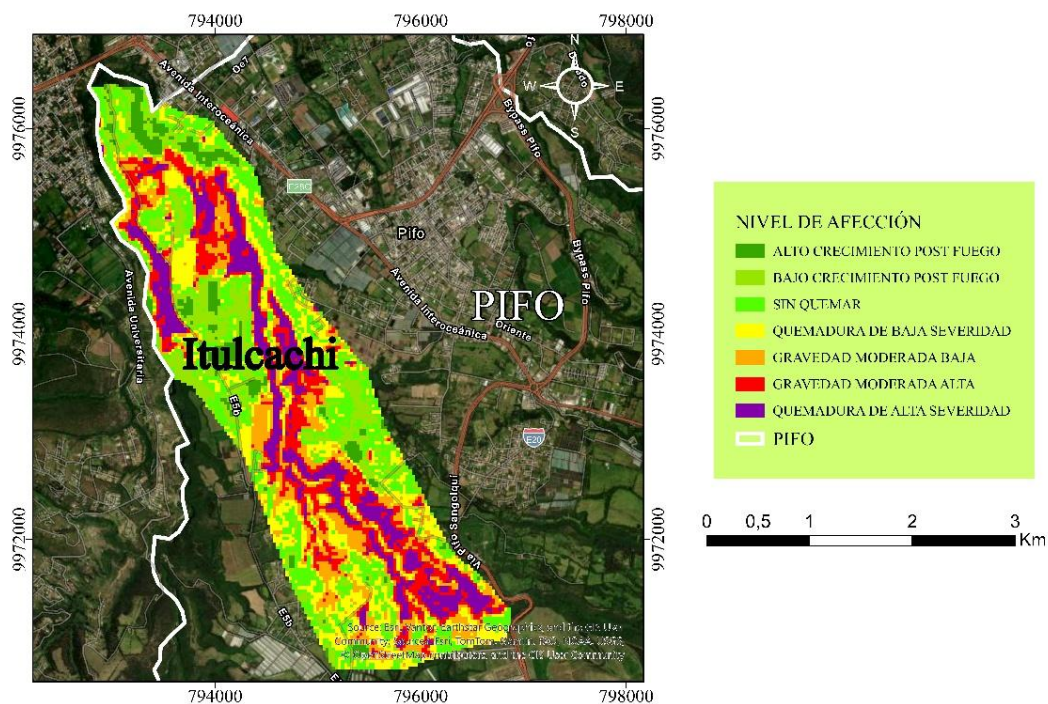
Todos los cálculos se realizan utilizando un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$).

Este tratamiento permite caracterizar de manera integral el comportamiento de los suelos de Itulachi después del incendio y comprender los procesos de degradación y resiliencia asociados a la severidad del fuego.

3. Resultados y discusión

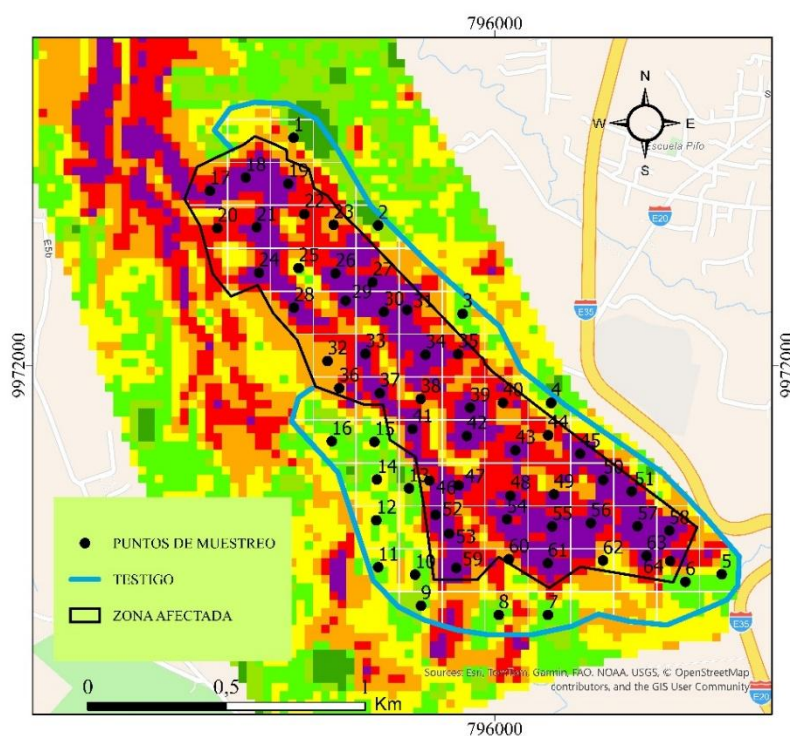
Los resultados obtenidos a partir del índice diferencial dNBR evidencian una marcada heterogeneidad

espacial en el grado de afectación del incendio dentro del área de estudio Mapa 2. La clasificación basada en los rangos propuestos por el USGS permitió discriminar claramente zonas no quemadas, áreas con baja severidad y sectores con afectación moderada a alta, reflejando la variabilidad en la intensidad térmica del incendio ocurrido durante la época seca de septiembre–octubre de 2024.



Se analizaron específicamente 62 muestras de suelo recolectadas en el sector Itulachi, parroquia Pifo, provincia de Pichincha, Ecuador. El número de muestras se estableció conforme el Acuerdo Ministerial 097-

A mediante la formula $Y = (X)^{0.3} \times (11.71)$, con $X = 102.5$ ha, resultando $Y = 62$ muestras. Se establecieron dentro del MAPA 3, los puntos 62 de muestreo individuales.



Variables físico-químicas

De las 17 variables analíticas evaluadas se priorizó aquellas que mostraron mayor sensibilidad frente a la severidad del incendio forestal. En particular se enfatiza en los resultados correspondientes nueve variables debido a su influencia directa sobre la fertilidad la estabilidad estructural y los procesos biogeoquímicos del suelo según lo mencionado por el portal de suelos de la FAO, estas variables analíticas permiten interpretar de manera integral los cambios físicos y químicos inducidos por el incendio y su relación con la capacidad de recuperación del ecosistema

mientras que las restantes se consideran complementarias para la comprensión global de los resultados.

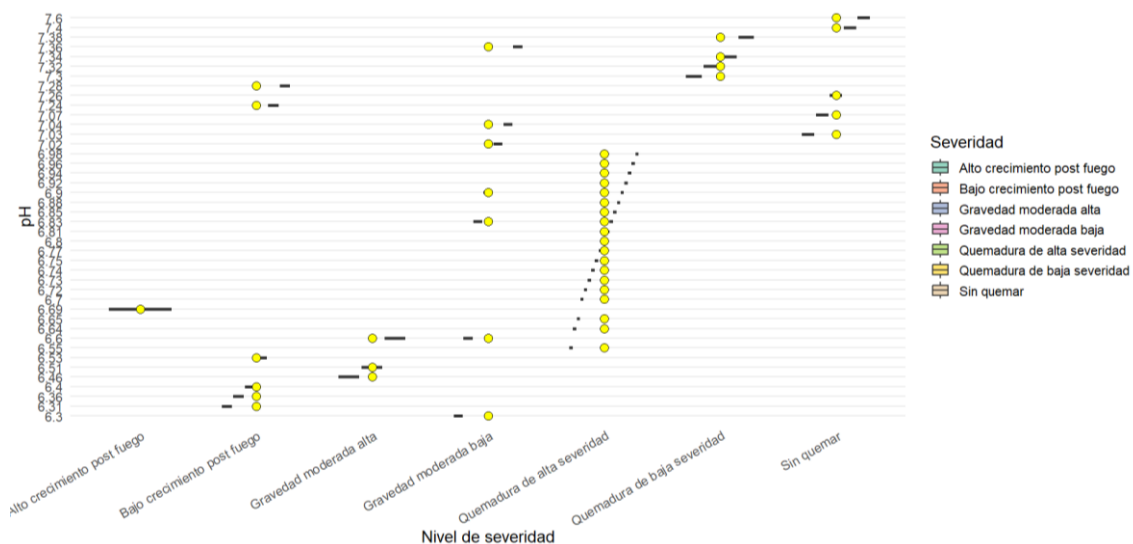
El Gráfico 1 muestra una diferenciación clara del pH del suelo en función del nivel de severidad del incendio, las categorías sin quemar y quemadura de baja severidad concentran los valores de pH más elevados del conjunto, con registros que se sitúan predominantemente en rangos neutros a ligeramente alcalinos. Esta tendencia indica que, en estas áreas, el impacto térmico fue limitado y no alteró de forma significativa los mecanismos

naturales de regulación de la acidez del suelo (Certini et al., 2021).

En contraste, las zonas clasificadas como quemadura de alta severidad, así como aquellas con gravedad moderada alta y moderada baja, presentan una mayor dispersión de los valores y una tendencia general hacia pH más bajos. Esta disminución progresiva del pH refleja

un efecto directo de la intensidad del fuego, asociado a la pérdida de compuestos básicos, la oxidación de la materia orgánica y la reducción de la capacidad amortiguadora del suelo (Dhungana et al., 2024). El patrón observado en el gráfico evidencia que, a mayor severidad del incendio, mayor es la probabilidad de acidificación del suelo.

Gráfico 1. Ph respecto a la severidad



Conductividad

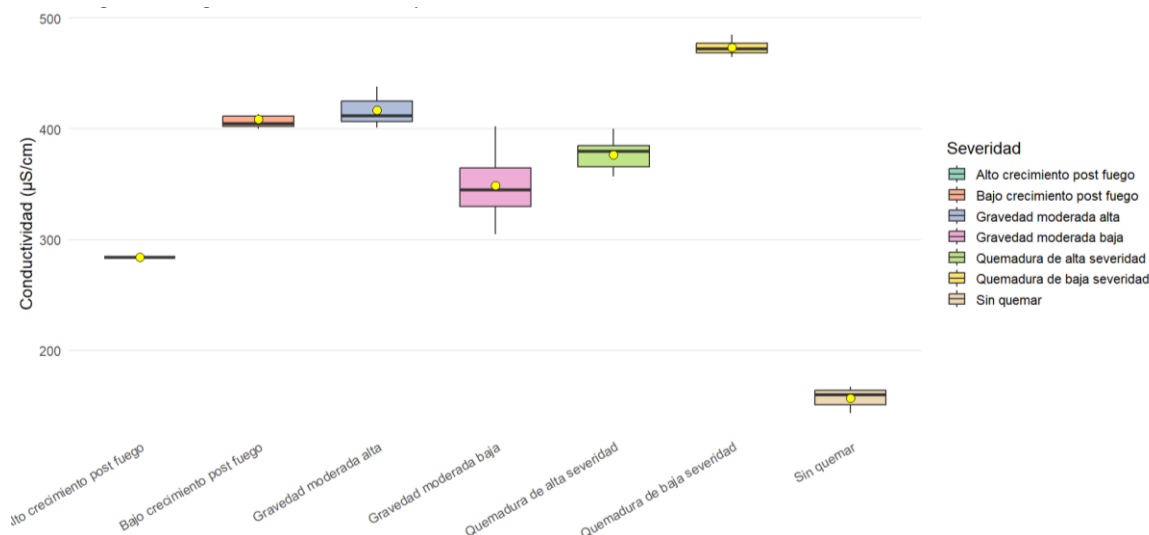
En el gráfico 2 el suelo sin quemar presenta los valores más bajos de conductividad, lo que indica una condición química estable y una baja concentración de sales solubles. En contraste, las áreas afectadas por quemaduras de baja severidad, junto con las categorías de gravedad moderada y alta, registran los valores más elevados, asociados a

la liberación de sales y cationes básicos producto de la combustión de la biomasa y la deposición de cenizas (Biswal & Bihari, 2018).

Este patrón sugiere que el incremento de la conductividad ocurre incluso en incendios de baja intensidad y se intensifica con la severidad del fuego, reflejando una alteración química del suelo que puede influir en la disponibilidad de

nutrientes y en los procesos de recuperación post-incendio.

Gráfico 2. Conductividad respecto a la severidad



Nitrógeno y fósforo

En los gráficos 3 y 4 se observa que nutrientes esenciales del suelo, como el nitrógeno total y el fósforo disponible, se ven significativamente afectados por la severidad de los incendios y la capacidad de regeneración postfuego. Los suelos sin quemar y aquellos con alta regeneración vegetal mantienen niveles relativamente altos y estables de nitrógeno y fósforo, reflejando mayor fertilidad y resiliencia ecosistémica. En contraste, las áreas con quemaduras de alta intensidad y bajo crecimiento postfuego presentan disminuciones marcadas: el nitrógeno se pierde principalmente por combustión y

volatilización, mientras que la reducción del fósforo se asocia a la volatilización de compuestos orgánicos y la pérdida de fracciones finas del suelo, limitando la retención y reciclaje de nutrientes (Xu et al., 2022). Estos resultados evidencian que tanto el nitrógeno como el fósforo son indicadores sensibles de la degradación edáfica postincendio y de la capacidad del suelo para sustentar la recuperación ecológica.

Gráfico 3. Nitrógeno respecto a la severidad

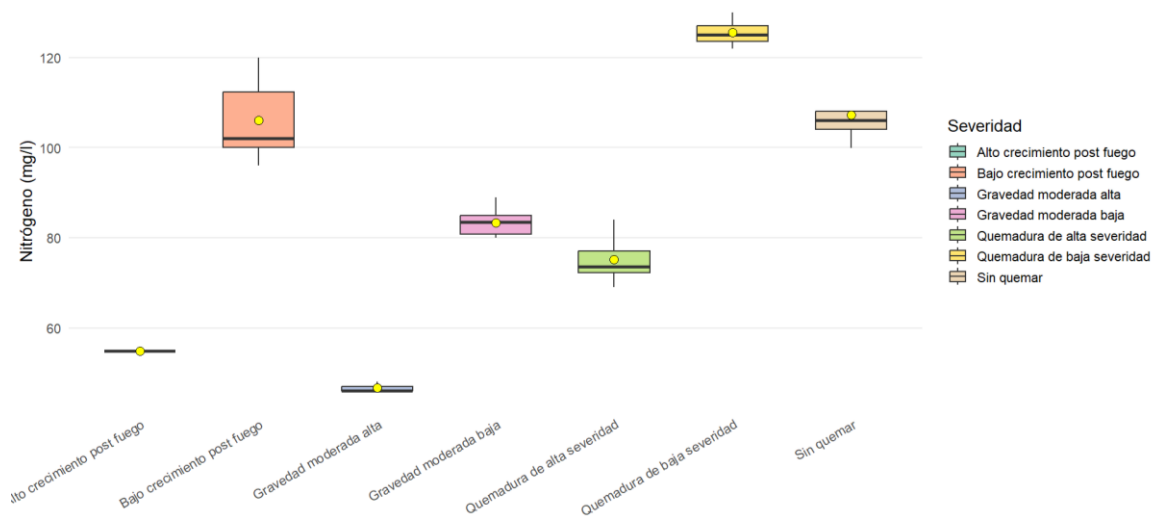
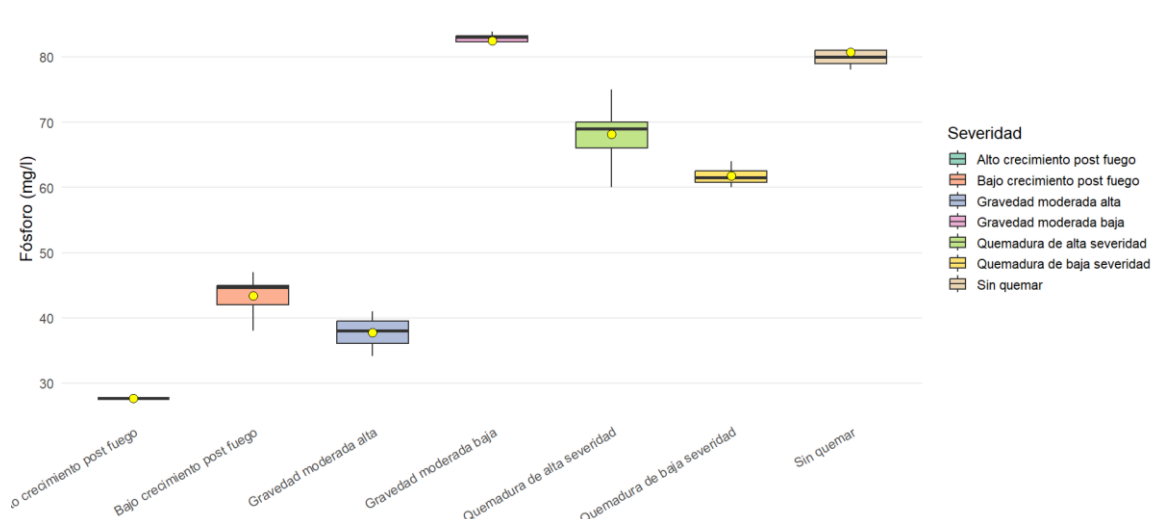


Gráfico 4. Fósforo respecto a la severidad



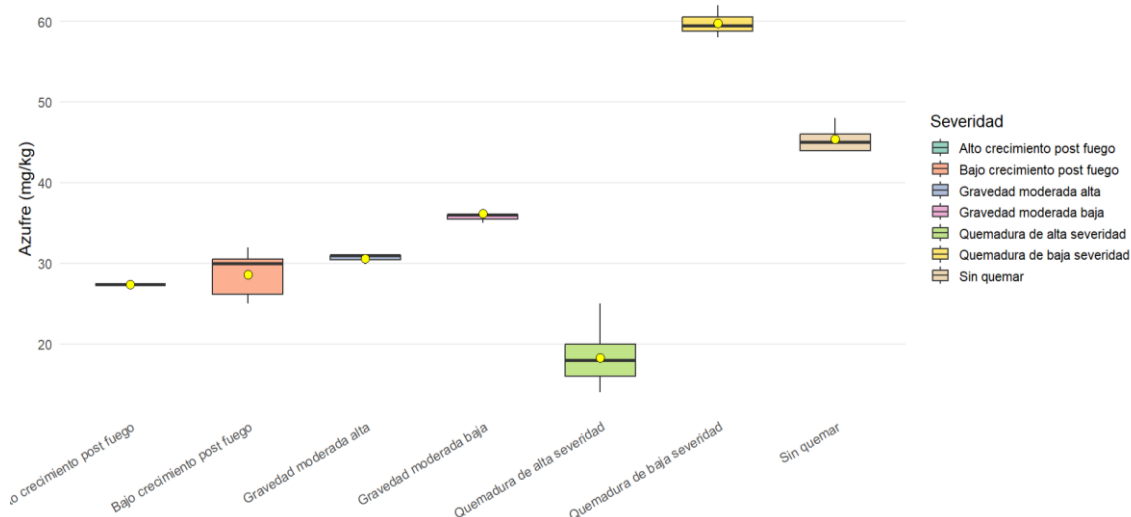
Azufre

El gráfico muestra que los contenidos más bajos de azufre se presentan en las áreas de quemadura de baja severidad y en los suelos sin quemar, lo que indica una condición edáfica estable y sin aportes relevantes derivados de la combustión. En contraste, las quemaduras de alta severidad

evidencian una reducción significativa del azufre, atribuible a la volatilización de compuestos azufrados a altas temperaturas y a la pérdida de materia orgánica, principal reservorio de este nutriente (Ngole-Jeme, 2019). Las zonas de severidad moderada presentan valores intermedios, reflejando una afectación parcial del azufre. En conjunto, los resultados confirman que la disponibilidad de azufre en el

suelo está directamente controlada por la intensidad del fuego.

Gráfico 5. Azufre respecto a la severidad



Potasio, calcio y magnesio

El mapa 7,8 y 9 presentan concentraciones más elevadas de potasio, calcio y magnesio en Condiciones de quemadura de alta y baja severidad, reflejando acumulación de sales y cationes debido a la combustión de materia orgánica y la lixiviación parcial (Wuyep, Ifegbesan, et al., 2024). En contraste, los suelos sin quemar y aquellos con alto crecimiento postfuego muestran ser uno de los valores más bajos y estables, indicando una mejor capacidad de retención de nutrientes y mayor resiliencia edáfica, los niveles intermedios en zonas de severidad moderada evidencian degradación

parcial dependiente de la intensidad térmica y la cobertura vegetal remanente. La elevación de potasio puede afectar procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la regulación osmótica (Sardans & Peñuelas, 2021), mientras que el aumento de calcio y magnesio influye en la estructura del suelo y su equilibrio químico, repercutiendo en la eficiencia metabólica y la regeneración vegetal postincendio (Ferro et al., 2020).

Gráfico 6. potasio respecto a la severidad

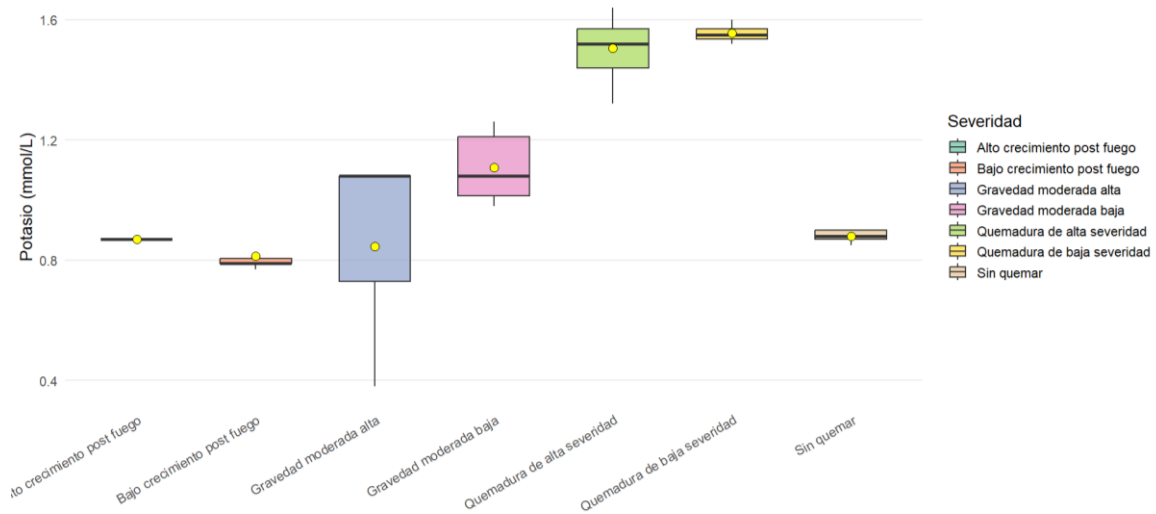


Gráfico 7. calcio respecto a la severidad

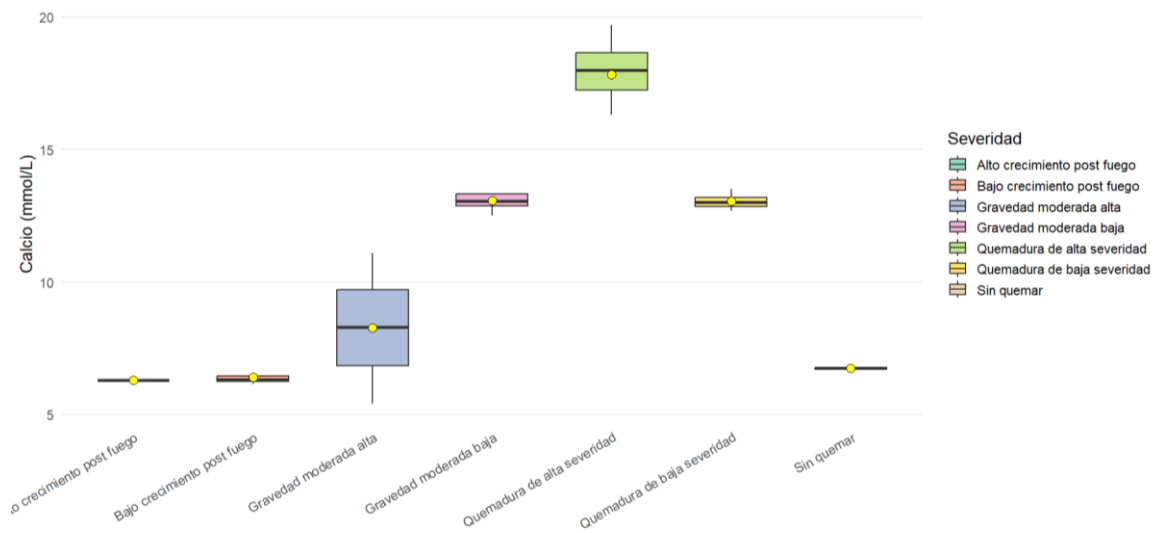
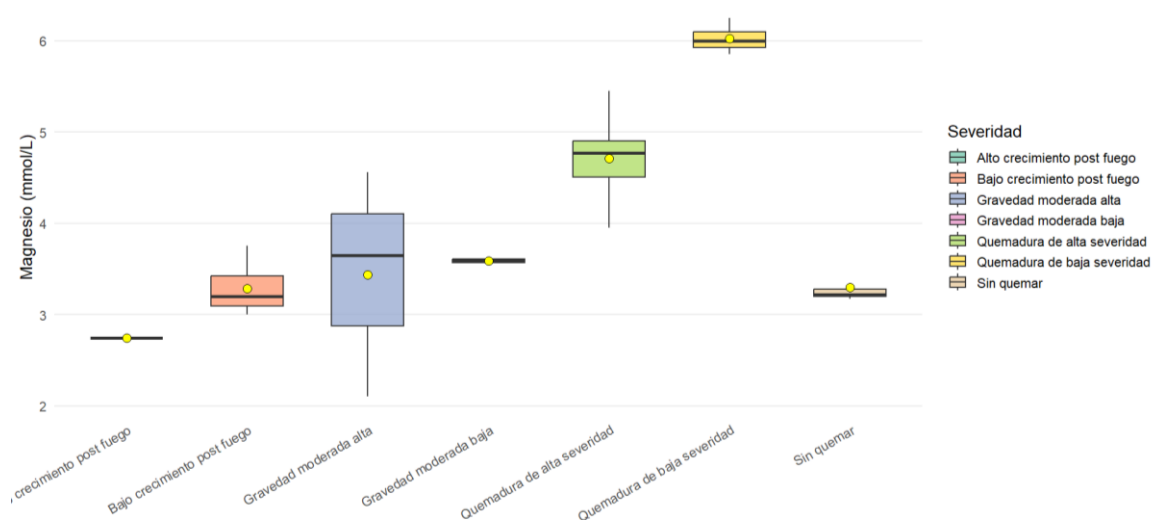


Gráfico 8. magnesio respecto a la severidad

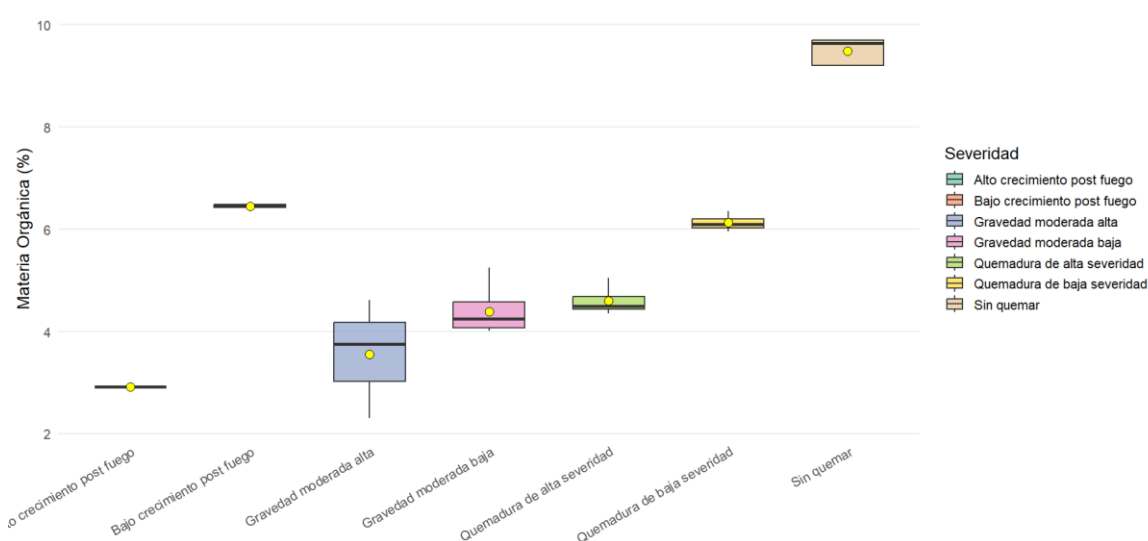


Materia orgánica

El gráfico 20 de materia orgánica muestra una clara disminución de su contenido en suelos afectados por incendios de acuerdo con la severidad, especialmente en aquellos con bajo crecimiento postfuego y quemaduras

moderadas-altas. Esta pérdida se debe a la combustión directa de residuos vegetales y humus, así como a la mineralización acelerada inducida por el calor, lo que reduce la capacidad del suelo para retener humedad, nutrientes y sostener actividad microbiana.

Gráfico 9. materia orgánica respecto a la severidad



4. Conclusiones

Las propiedades físicas evidenciaron una degradación estructural en función de la severidad del fuego ya que la proporción de arcilla disminuyó en zonas severamente quemadas, mientras que la fracción arenosa aumentó, generando una textura más gruesa y menor cohesión (Megremi et al., 2024), este cambio reduce la capacidad de retención de agua y nutrientes, incrementando la

susceptibilidad a la erosión (Nasir Ahmad et al., 2020).

El contenido de limo mostró variaciones leves pero significativas, reflejando alteraciones en la agregación de partículas y la estabilidad estructural este efecto sumado a la pérdida de fracciones finas, evidencia un proceso de desertificación incipiente en zonas de alta severidad, especialmente bajo condiciones climáticas extremas como sequías prolongadas

o lluvias intensas (Stamou et al., 2025).

La disminución conjunta de los micronutrientes sugiere un deterioro general de la capacidad bioquímica del suelo, restringiendo la regeneración natural y la fijación de carbono, estos resultados concuerdan con estudios realizados por (Carrión-Paladines et al., 2022b) y (Wuyep, Rampedi, et al., 2024) quienes encontraron que los incendios de alta severidad reducen significativamente la disponibilidad de micronutrientes esenciales, afectando la sucesión ecológica y la funcionalidad del ecosistema.

Bibliografía

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539-42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Alcaras, E., Costantino, D., Guastaferro, F., Parente, C., & Pepe, M. (2022). Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 14(7), 1727. <https://doi.org/10.3390/rs14071727>
- Alcaras, E., Costantino, D., Guastaferro, F., Parente, C., & Pepe, M. (2025). Forest Fire Severity Level Using dNBR Spectral Index. *Revue Internationale de Geomatique*, 34(1), 89-101. <https://doi.org/10.32604/rig.2025.057562>
- Arias-Muñoz, P., Chuma-Pomasqui, L., Cacuango, P. C., & Jácome-Aguirre, G. (2024). Susceptibilidad para incendios de cubierta vegetal: Una evaluación desde los métodos multicriterio y radiofrecuencia (Cantón Cotacachi, Ecuador). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 50(1), 21-39. <https://doi.org/10.18172/cig.5867>
- Arifin, M., Devnita, R., Anda, M., Goenadi, D. H., & Nugraha, A. (2022). Characteristics of Andisols Developed from Andesitic and Basaltic Volcanic Ash in Different Agro-Climatic Zones. *Soil Systems*, 6(4), 78. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040078>
- Arunrat, N., Kongsurakan, P., Solomon, L. W., & Sereenonchai, S. (2024). Fire Impacts on Soil Properties and Implications for

- Sustainability in Rotational Shifting Cultivation: A Review. *Agriculture*, 14(9), 1660. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091660>
- Belcher, H. A., Litwa, K., Guthold, M., & Hudson, N. E. (2022). The Applicability of Current Turbidimetric Approaches for Analyzing Fibrin Fibers and Other Filamentous Networks. *Biomolecules*, 12(6), 807. <https://doi.org/10.3390/biom12060807>
- Biswal, T., & Bihari, R. (2018). Impact of Fly Ash on Soil Properties and Productivity. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.30954/0974-1712.04.2018.8>
- Carrión-Paladines, V., Hinojosa, M. B., Jiménez Álvarez, L., Reyes-Bueno, F., Correa Quezada, L., & García-Ruiz, R. (2022a). Effects of the Severity of Wildfires on Some Physical-Chemical Soil Properties in a Humid Montane Scrublands Ecosystem in Southern Ecuador. *Fire*, 5(3), 66. <https://doi.org/10.3390/fire5030066>
- Carrión-Paladines, V., Hinojosa, M. B., Jiménez Álvarez, L., Reyes-Bueno, F., Correa Quezada, L., & García-Ruiz, R. (2022b). Effects of the Severity of Wildfires on Some Physical-Chemical Soil Properties in a Humid Montane Scrublands Ecosystem in Southern Ecuador. *Fire*, 5(3), 66. <https://doi.org/10.3390/fire5030066>
- Certini, G., Moya, D., Lucas-Borja, M. E., & Mastrolonardo, G. (2021). The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. *Forest Ecology and Management*, 488, 118989. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118989>
- Clavijo, P., Pérez, S., Guanoquiza, J., & Caguana, M. (2025). Análisis de indicadores de sostenibilidad ambiental en los Páramos de los Illinizas Sur: Un estudio de caso en las termas de Cunuyacu, Ecuador. *REVISTA DELOS*, 18(63), e3661. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n63-131>
- Dhungana, B. P., Chhetri, V. T., Baniya, C. B., Sharma, S. P., Ghimire, P., & Vista, S. P. (2024). Post-fire Effects on Soil Properties in High altitude Mixed-conifer Forest of Nepal. *Trees, Forests and People*, 17, 100633. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100633>
- Ferro, D. A., Lozano, L. A., Bartoli, C. G., Fanello, D. D., Larrieu, L., Millan, G. J., & Soracco, C. G. (2020). Disponibilidad y relación de calcio y magnesio.

- Revista de la Facultad de Agronomía, 119(2), 057.
<https://doi.org/10.24215/16699513e057>
- Fuentes-Ramirez, A., Almonacid-Muñoz, L., Muñoz-Gómez, N., & Moloney, K. A. (2022). Spatio-Temporal Variation in Soil Nutrients and Plant Recovery across a Fire-Severity Gradient in Old-Growth Araucaria-Nothofagus Forests of South-Central Chile. *Forests*, 13(3), 448.
<https://doi.org/10.3390/f13030448>
- Gajendiran, K., Kandasamy, S., & Narayanan, M. (2024). Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental Research*, 240, 117537.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117537>
- Garnica, J. G. F. (2021). Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales Especial-1*.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>
- Gastwirth, J. L., Gel, Y. R., & Miao, W. (2009). The Impact of Levene's Test of Equality of Variances on Statistical Theory and Practice. *Statistical Science*, 24(3), 343-360.
<https://doi.org/10.1214/09-STS301>
- Henao, R. G., Méndez, N., & Ospina, D. (2001). DESIGN OF A SAMPLING NETWORK FOR AN ESTUARY IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 25(97), 509-518.
[https://doi.org/10.18257/raccefyn.25\(97\).2001.2784](https://doi.org/10.18257/raccefyn.25(97).2001.2784)
- Ibrahim, K., Wang, Q., Wang, L., Zhang, W., Peng, C., & Zhang, S. (2021). Determining the Optimum Level of Soil Olsen Phosphorus and Phosphorus Fertilizer Application for High Phosphorus-Use Efficiency in Zea mays L. in Black Soil. *Sustainability*, 13(11), 5983.
<https://doi.org/10.3390/su13115983>
- Ilbay-Yupa, M., Lavado-Casimiro, W., Rau, P., Zubieta, R., & Castellón, F. (2021). Updating regionalization of precipitation in Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(3), 1513-1528.
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03476-x>
- Liu, K., Xia, Y., Li, X., Sun, C., Yue, W., Wang, Q., Zhao, S., & Chen, S. (2025). Identification of water sources of mine water bursts based on the FPS-DT model. *Scientific Reports*, 15(1), 27327.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-00000-0>

- <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13301-y>
- Longbottom, T., Wahab, L., Min, K., Jurusik, A., Moreland, K., Dolui, M., Thao, T., Gonzales, M., Rojas, Y., Alvarez, J., Malone, Z., Yan, J., Ghezzehei, T., & Berhe, A. (2022). What's Soil Got to Do with Climate Change? *GSA Today*, 32(5), 4-10. <https://doi.org/10.1130/GSATG519A.1>
- Lopez Choque, M. A., Lopez Mamani, M. A., & Ticona, E. Y. (2023). *Evaluación de los parámetros de calidad para la determinación de nitrógeno total en suelos | Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. <https://doi.org/10.53287/tuov3244ge80j>
- Lucas-Borja, M. E., Fernández, C., Plaza-Alvarez, P. A., & Zema, D. A. (2022). Variability of hydraulic conductivity and water repellency of soils with fire severity in pine forests and reforested areas under Mediterranean conditions. *Ecohydrology*, 15(8), e2472. <https://doi.org/10.1002/eco.2472>
- Ma, B., Liu, X., Tong, Z., Zhang, J., & Wang, X. (2024). Coupled Effects of High Temperatures and Droughts on Forest Fires in Northeast China. *Remote Sensing*, 16(20), 3784. <https://doi.org/10.3390/rs16203784>
- Megremi, I., Stathopoulou, E., Vorris, E., Kostakis, M., Karavoltsos, S., Thomaidis, N., & Vasilatos, C. (2024). Mediterranean Wildfires' Effect on Soil Quality and Properties: A Case from Northern Euboea, Greece. *Land*, 13(3), 325. <https://doi.org/10.3390/land13030325>
- Mosley, L. M., Rengasamy, P., & Fitzpatrick, R. (2024). Soil pH: Techniques, challenges and insights from a global dataset. *European Journal of Soil Science*, 75(6), e70021. <https://doi.org/10.1111/ejss.70021>
- Mwendwa, S. (2022). Revisiting soil texture analysis: Practices towards a more accurate Bouyoucos method. *Heliyon*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09395>
- Nanda, A., Mohapatra, D. B. B., Mahapatra, A. P. K., Mahapatra, A. P. K., & Mahapatra, A. P. K. (2021). Multiple comparison test by Tukey's honestly significant difference (HSD): Do the confident level control type I error. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 6(1), 59-65.

- <https://doi.org/10.22271/math.s.2021.v6.i1a.636>
- Nasir Ahmad, N. S. B., Mustafa, F. B., Muhammad Yusoff, S. @ Y., & Didams, G. (2020). A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2), 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.04.001>
- Ngole-Jeme, V. M. (2019). Fire-Induced Changes in Soil and Implications on Soil Sorption Capacity and Remediation Methods. *Applied Sciences*, 9(17), 3447. <https://doi.org/10.3390/app9173447>
- Nolan, R. H., Anderson, L. O., Poulter, B., & Varner, J. M. (2022). Increasing threat of wildfires: The year 2020 in perspective: A Global Ecology and Biogeography special issue. *Global Ecology and Biogeography*, 31(10), 1898-1905. <https://doi.org/10.1111/geb.13588>
- Ortiz, M., Delatorre Castillo, J. P., Sepúlveda, I., Low, C., Ruiz, K. B., Delatorre Herrera, J., Ortiz, M., Delatorre Castillo, J. P., Sepúlveda, I., Low, C., Ruiz, K. B., & Delatorre Herrera, J. (2021). Effects of different boron concentrations and pH on growth Zea mays var. Capia blanco, an ancestral corn from Chile. *Idesia (Arica)*, 39(2), 111-119. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000200111>
- Pazmiño, D. (2019). Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 7(1), 10-18. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800>
- Peñaloza, D. J., Barúa, M. G., Escalada, J. P., & Pajares, A. M. (2023). Técnica espectroscópica de absorción atómica para determinaciones en química ambiental. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 15(3), 157-176. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v15.n3.987>
- Pérez, E. S., Blandon, B. A. R., Álvarez, E. H., Cruz, R. G., Bernabé-Antonio, A., Orozco-Guareño, E., Ramírez-López, C. B., Hernández, J. A., & Delgado-Fornué, E. (2019). Propiedades del suelo y nitrógeno como indicadores del crecimiento en plantaciones comerciales de teca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.398>
- Porras Maturan, A. (2021). *Caracterización de indicadores de suelo para monitoreo de restauración*

- post incendios en el Parque Nacional Torres del Paine* [Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/AGR/63715>
- Preciado-Guzmán, J. F., Pineda-Pineda, J., Corlay-Chee, L., Vázquez-Alarcón, A., Vargas-Hernández, M., & Robledo-Santoyo, E. (2024). Comparación de Métodos para Obtener la Capacidad de Intercambio Catiónico y Cationes Intercambiables de los Suelos. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 42. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1843>
- Ramirez, D. W., Lértora, G., Vargas, R., & Aponte, H. (2022). Efecto de los incendios sobre la cobertura vegetal, almacenamiento de carbono y biomasa vegetal en un humedal costero: El caso de Los Pantanos de Villa (Lima-Perú), un humedal de la costa árida del Pacífico. *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 348-362. <https://doi.org/10.15517/rev.bi.ol.trop.v70i1.46084>
- Ramos-Rodríguez, M. P., Tigua-Parrales, M. J., Baque-Ramos, J. B., Manrique-Toala, T. O., & Castro-Landín, A. L. (2024). Efectos del fuego sobre características físico-químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal. *Madera y Bosques*, 30(1), e3012509-e3012509. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3012509>
- Reyes-Bueno, F., & Balcazar-Gallegos, C. (2021). FIGEMPA: Investigación y Desarrollo. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11(1), 50-60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2634>
- Santisteban, J. I., Mediavilla, R., López-Pamo, E., Dabrio, C. J., Zapata, M. B. R., García, M. J. G., Castaño, S., & Martínez-Alfaro, P. E. (2004). Loss on ignition: A qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? *Journal of Paleolimnology*, 32(3), 287-299. <https://doi.org/10.1023/B:JOP.L.0000042999.30131.5b>
- Sardans, J., & Peñuelas, J. (2021). Potassium Control of Plant Functions: Ecological and Agricultural Implications. *Plants*, 10(2), 419. <https://doi.org/10.3390/plants10020419>
- Scheiner, S. M. (2024). *Fires, Ecological Effects of*. 536-545. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00248-6>
- Stamou, G. P., Papakostas, S., Rojas, C., & Papatheodorou,

- E. M. (2025). Short term effects of fire on assembly rules and β -diversity of soil bacteria in Mediterranean soils. *Applied Soil Ecology*, 209, 105994. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105994>
- Vaca, C. C., Calahorrano, J., & Manzano, M. (2024). Revista Colombia Forestal. *Colombia forestal*, 27(1), e20111. <https://doi.org/10.14483/2256201X.20111>
- Wuyep, S. Z., Department of Geography, Environmental Management and Energy Studies, University of Johannesburg, Johannesburg, South Africa, Department of Geography, Plateau State University, Bokokos, Nigeria, Ifegbesan, A. P., Department of Arts and Social Sciences Education, Olabisi Onabanjo University, Ago-Iwoye, Nigeria, Innocent, M., & University of Rwanda, College of Education, Kigali, Rwanda. (2024). Effects of Fire on Physical and Chemical Properties of Soil in Fwangnin Bokokos District, Nigeria. *Trends in Ecological and Indoor Environmental Engineering*, 2(3), 42-49. <https://doi.org/10.62622/TEIE.E.024.2.3.42-49>
- Wuyep, S. Z., Rampedi, I. T., Ifegbesan, A. P., & Innocent, M. (2024). *Effects of Fire on Physical and Chemical Properties of Soil in Fwangnin Bokokos District, Nigeria*. <https://doi.org/10.62622/TEIE.E.024.2.3.42-49>
- Wuyep, S. Z., Ifegbesan, A. P., Innocent, M., Department of Geography, Environmental