

Artículo de investigación

## Actividad enzimática en suelos cercanos al complejo industrial “José Antonio Anzoátegui” (CIJAA) estado Anzoátegui

S. Flores<sup>1\*</sup> , M. Rangel<sup>1</sup> , N. Casanova Hernández<sup>1</sup> ,  
H. Sulbarán<sup>1,2</sup> , Y. Linares<sup>1</sup> 

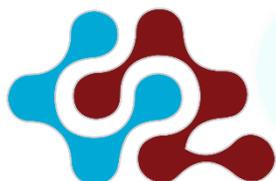
<sup>1</sup> Laboratorio de Ecología de Suelos, Ambiente y Agricultura, Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Altos de Pipe, Venezuela.

<sup>2</sup> Laboratorio de Ecología y Genética de Poblaciones, Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Altos de Pipe, Venezuela.

### Resumen

Se evaluaron las propiedades biológicas (respiración edáfica (RE) y actividad enzimática (AE)) de los suelos de bosques secos tropicales circundantes al Complejo Industrial, “José Antonio Anzoátegui” (CIJAA), Venezuela. Se establecieron tres sitios de estudio en función de la distancia a CIJAA: Cura (a 40 km-CIJAA), Fortuna (a 9 km-CIJAA) y Coque (a 1,3 km-CIJAA). Se colectaron 27 muestras de suelo/sitio. Se obtuvo que tanto RE como AE aumentaron con la distancia al complejo, siguiendo este orden: Cura > Fortuna > Coque. Estos resultados sugieren que la cercanía al complejo podría estar influenciando negativamente tanto RE como AE, en vista de que se registraron valores de mg de C-CO<sub>2</sub> /100 g de suelo/día < 100 en Coque, ~ 150 en Fortuna y > 250 en Cura. La mayor AE se obtuvo para la fosfatasa ácida en Cura (450 µg (p-NF) g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) y la menor para la deshidrogenasa en Coque (17 µg (TPF) g<sup>-1</sup> 24h<sup>-1</sup>). Esta tendencia se observó en el resto de las enzimas. Las emisiones del CIJAA a la atmósfera y su consecuente deposición sobre los bosques podrían afectar negativamente a los microorganismos del suelo y a las propiedades biológicas de los mismos.

**Palabras clave:** enzimas, suelos, actividad biológica, respiración edáfica, actividad enzimática



CIENCIA EN REVOLUCIÓN

**Recibido:** 27 de octubre del 2022

**Aceptado:** 16 de enero del 2023

**Publicado:** 11 de Agosto del 2023

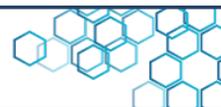
**Conflicto de intereses:** los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

**DOI:** <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7271877>

**\*Autor para correspondencia:**

Saúl Flores

**e-mail:** [jassanflores@gmail.com](mailto:jassanflores@gmail.com)



Research article

## Enzyme Activity in Soils near the Industrial Complex “José Antonio Anzoátegui” (CIJAA) Anzoátegui State

S. Flores<sup>1\*</sup> , M. Rangel<sup>1</sup> , N. Casanova Hernández<sup>1</sup> ,  
H. Sulbarán<sup>1,2</sup> , Y. Linares<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Laboratorio de Ecología de Suelos, Ambiente y Agricultura, Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Altos de Pipe, Venezuela.

<sup>2</sup> Laboratorio de Ecología y Genética de Poblaciones, Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Altos de Pipe, Venezuela.

### Abstract

Biological properties (edaphic respiration (ER) and enzymatic activity (EA)) of tropical dry forests soils surrounding the Industrial Complex, "José Antonio Anzoátegui" (CIJAA), in Venezuela were evaluated. Three sites were selected for the study based on the distance to CIJAA and collected 27 soil samples by each site: Cura (to 40 km-CIJAA), Fortuna (to 9 km-CIJAA), and Coque (to 1.3 km-CIJAA). It was found that RE and AE increased with the distance from the complex, following this order: Cura > Fortuna > Coque. The results suggest that the proximity to the complex could negatively affect biological properties. The values of mg de C-CO<sub>2</sub> /100 g de soil/day registered in the three sites were: < 100 in Coque, 150 ~ in Fortuna, and > 250 in Cura. The highest value AE was for acid phosphatase in Cura (450 μg (p-NF) g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) and the lowest for dehydrogenase in Coque (17 μg (TPF) g<sup>-1</sup> 24 h<sup>-1</sup>). This trend was observed in the other enzymes. CIJAA emissions into the atmosphere and their consequent deposition on forests could negatively affect soil microorganisms and their biological properties

**Keywords:** enzymes, soils, biological activity, edaphic respiration, enzymatic activity.



Received: October 27, 2022

Accepted: January 16, 2023

Published: August 11, 2023

**Conflict of interest:** the authors declare that there are no conflicts of interest.

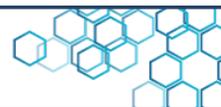
**DOI:** <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7271877>

**\*Corresponding author:**

Saúl Flores

**e-mail:**

[jassanflore@gmail.com](mailto:jassanflore@gmail.com)



## 1. Introducción

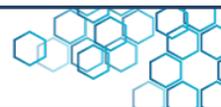
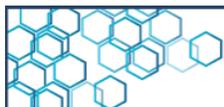
Las actividades humanas, tales como los procesos industriales, pueden contaminar los suelos, ocasionando serios problemas en su funcionamiento, calidad y salud [1]. La calidad del suelo está definida por sus características biológicas, físicas y químicas. Ahora, dentro de las características biológicas, se encuentran la biomasa microbiana, la respiración, las actividades enzimáticas y la diversidad de organismos del suelo que sirven de indicadores para evaluar la funcionalidad y productividad de un ecosistema [2]. Estas características son sensibles a pequeños cambios ambientales, al manejo o perturbaciones del sistema y proporcionan información inmediata, precisa y exacta a un costo económico bajo [3-6]. Ensayos realizados con enzimas en suelos, han sido usados para investigar procesos bioquímicos y medir la calidad ambiental de los suelos [7-10]. Así mismo, los microorganismos del suelo y la actividad enzimática como principal sensor de estrés del ecosistema, pueden ser usados para evaluar la calidad y funcionamiento de los ecosistemas ya que son más sensibles que el contenido de nutrientes al cambio climático y a la actividad humana [4, 11]. En efecto, algunos estudios que han evaluado el impacto de las carreteras sobre las propiedades y diversidad de microorganismos en los suelos de bosques localizados en áreas de posible impacto, no han encontrado diferencias entre las propiedades fisicoquímicas (humedad, temperatura, pH, etc.) en suelos afectados por las carreteras y suelos localizados fuera del área de influencia de dichas carreteras. Sin embargo, otros estudios de impacto ambiental en los que se ha evaluado las características biológicas del suelo (deshidrogenasa,



ureasa y fosfatasa) han encontrado que la actividad biológica en la cercanía de las carreteras ha disminuido [12–17].

Existe evidencia de que las propiedades biológicas de los suelos son indicadores tempranos de estrés, lo cual los hace idóneos para programas de monitorización y de fitorremediación de suelos contaminados [4, 14, 18]. Las bacterias, hongos, algas, nematodos y protozoarios son los microorganismos biológicos más importantes del suelo [6, 19], liberan enzimas al suelo y una fracción de estas, quedan inmovilizadas en la fase sólida del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales [20, 21]. Las enzimas, son proteínas catalizadoras de reacciones químicas en los sistemas vivos, que transforman sustratos en productos necesarios para los ciclos biológicos [20]. La velocidad de reacción de la actividad enzimática depende de la profundidad y tipo de suelo, humedad, pH, fuerza iónica, temperatura, cantidad y calidad de sustrato disponible, regímenes de manejo y de la presencia o no de inhibidores [2, 11, 22, 23]. En el suelo, las enzimas participan en el ciclo de nutrientes y pueden influenciar la disponibilidad de nutrientes en las plantas por lo cual juega un importante rol en la fase inicial de descomposición de la materia orgánica [11, 24, 25]. En los suelos de bosques naturales se ha evidenciado una mayor actividad de la enzima fosfatasa en comparación con sistemas agrícolas, debido a que en estos suelos hay mayor contenido de materia orgánica y mejor estructura, lo cual propicia una aeración rápida [26].

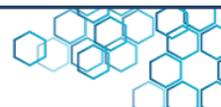
Con el fin de determinar variaciones en la calidad del suelo en función de la distancia al Complejo Industrial José Antonio Anzoátegui (CIJAA), en este trabajo se evaluó la respiración del suelo y la actividad de las enzimas;  $\beta$ -glucosaminidasa,  $\beta$ -glucosidasa y fosfatasa ácida,



las cuales están involucradas en los ciclos del nitrógeno (N), carbono (C) y fósforo (P), respectivamente. Así mismo, se determinó la actividad biológica potencial a través de la deshidrogenasa [5, 27]. Es importante resaltar que, hasta ahora, no hay datos publicados de las propiedades físico-químicas y biológicas de estos suelos en términos de la calidad como consecuencia de la cercanía al complejo.

## 2. Metodología

El Complejo Industrial José Antonio Anzoátegui se encuentra ubicado en Venezuela al norte del Estado Anzoátegui a 31 km al oeste de la ciudad de Barcelona. Se seleccionaron tres sitios de estudio: Coque a una distancia de 1,3 km del CIJAA, Fortuna a 9 km de distancia del CIJAA, y Cura a 40 km del CIJAA. El muestreo de suelo fue realizado en el período de sequía. En cada sitio de estudio, se establecieron 3 parcelas, con dimensiones de 10 x 50 m<sup>2</sup> cada una, con una distancia de 20 m entre parcelas. En cada parcela, se tomaron, secuencialmente, 9 muestras de suelo con barreno de percusión con profundidad de 0 a 10 cm, distancia aproximada de 5 m entre cada punto donde se extrajo el suelo. El suelo se almacenó en bolsas plásticas con cierre hermético, previamente rotuladas, luego, fueron refrigeradas en cava hasta llegar al laboratorio, para su inmediata determinación de respiración y actividad enzimática.

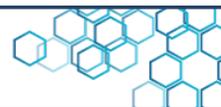


## 2.1 Respiración edáfica

Se midió la respiración por cuantificación de la producción de C-CO<sub>2</sub> en las tres réplicas de suelo de 20 g por sitio. Las muestras fueron incubadas durante 22 días, en frascos de vidrio a temperatura ambiente. Para adsorber el CO<sub>2</sub> se utilizaron 5 mL de NaOH (0,5 M); en cada tiempo de medición, se agregó cloruro de bario (2 %) para precipitar el carbonato y, posteriormente, el exceso de NaOH se tituló con HCl (0,5 N); empleando fenolftaleína como indicador. La cantidad de CO<sub>2</sub> se expresó en mg de C-CO<sub>2</sub> por 100 g de suelo [28].

## 2.2 Actividad de la enzima glucosidasa

El método está basado en la determinación del p-nitrofenol liberado después de incubar la muestra de suelo con una solución de p-nitrofenil-β-D-glucopiranosido. La actividad de la glucosidasa se determinó en una alícuota de 1 g de suelo fresco, proveniente de los cilindros de control/crecimiento, incubado por 1 h a 37 °C, usando p-nitrofenil-β-D-glucopiranosido como sustrato [10]. Al final del período de incubación, se añadió 0,5 M de CaCl<sub>2</sub> y 0,5 M de NaOH. En el sobrenadante resultante, se determinó la concentración de p-nitrofenol en (μg (p-NF) g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). Así mismo, la actividad de la β-glucosaminidasa fue obtenida de acuerdo con [29].



### 2.3 Actividad de la enzima deshidrogenasa

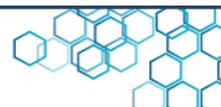
La actividad de la deshidrogenasa se determinó usando cloruro de trifeniltetrazolium (TTC), como sustrato en alícuotas de suelo fresco (1 g), proveniente de los cilindros de control/crecimiento, incubados por 24 h a 37 °C [9]. Luego de la incubación, las muestras fueron extraídas con metanol para determinar colorimétricamente al trifenilformazan (TPF) en  $\mu\text{g (TPF) g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$  como producto final [30].

### 2.4 Actividad de la enzima fosfatasa ácida

Se determinó usando p-nitrofenilfosfato como sustrato en incubaciones de suelo fresco (1 g) a 37 °C, durante 30 min [29]. Al final del período de incubación, se añadió 0,5 M de  $\text{CaCl}_2$  y 0,5 M de NaOH. En el sobrenadante resultante se determinó la concentración de p-nitrofenol en  $(\mu\text{g (p-NF) g}^{-1} \text{ h}^{-1})$ .

### 2.5 Análisis estadísticos

Para determinar diferencias entre los sitios de estudio, se evaluaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas entre los grupos (sitios) sobre cada una de las variables estudiadas. Para la prueba de normalidad se realizó la prueba de Shapiro-Wilk, dado que los grupos tienen menos de 50 eventos, mientras que para la prueba de



homocedasticidad de las varianzas, se realizó la prueba de Levene. Cuando se cumplían los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas entre los grupos, se realizó un análisis de la varianza ANOVA, cuando no se cumplían los supuestos, se realizó un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis. Luego, se realizó una comparación múltiple de medias de contraste post-hoc para identificar cuales grupos eran diferentes.

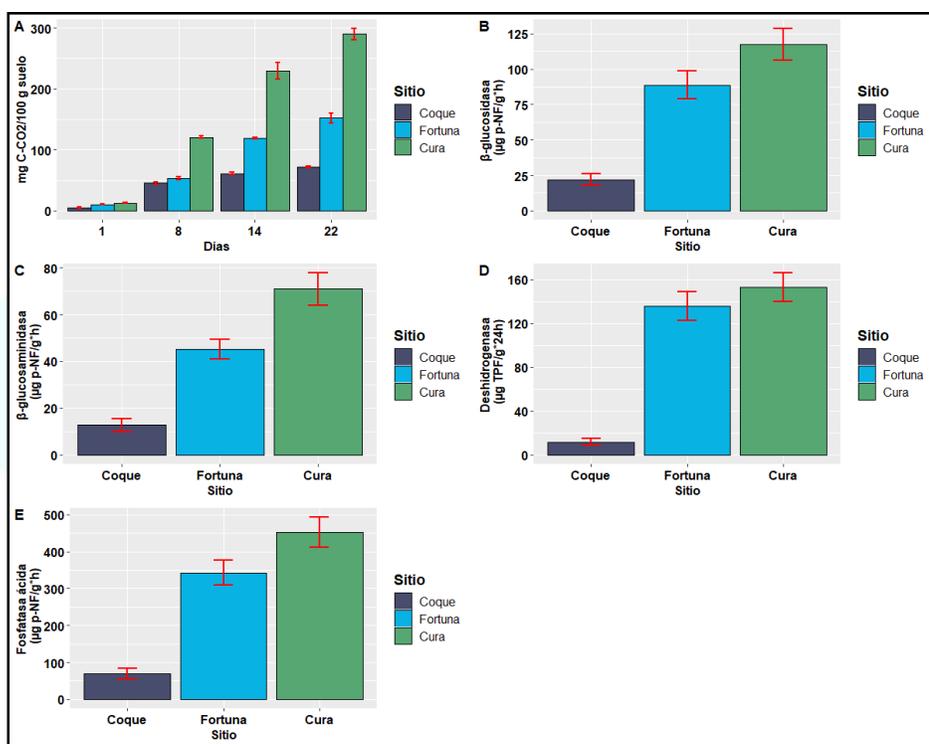
## 2.6 Permanova, Permutest, PCoA

Con los datos de las determinaciones de las enzimas:  $\beta$ -glucosidasa,  $\beta$ -glucosaminidasa, deshidrogenasa, y fosfatasa ácida, se determinaron diferencias multivariadas entre los sitios Coque, Cura y Fortuna, aplicando un análisis de varianza basado en permutaciones (Permanova), obtenidos a partir de 999 permutaciones. También, se realizó un análisis de dispersión multivariada (Permutest). Finalmente, se llevó a cabo un análisis de coordenadas principales (PCoA), con el fin de maximizar las diferencias en el espacio multivariado. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa R versión 4.2.1 [31].

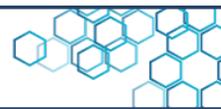
## 3. Discusión de resultados

La respiración edáfica (mg de C-CO<sub>2</sub>/100 g de suelo/día) aumentó con la distancia al complejo, se puede observar en la Figura 1A, siendo mayor en el sitio Cura (a 40 km del CIJAA), seguido del sitio Fortuna (a 9 km del CIJAA). Los menores valores de respiración fueron encontrados en

el sitio Coque (a 1,3 km del CIJAA). El análisis de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas arrojaron que los datos de la respiración edáfica entre los sitios no se ajustan a una distribución normal con valor de  $p = 0,04798$ , para  $p \geq 0,05$ , tampoco tienen varianzas iguales entre los grupos, ya que el valor de  $p$  fue de  $p = 0,02001$  para  $p \geq 0,05$ .



**Figura 1.** Representación gráfica de la respiración edáfica y actividad enzimática. A) Respiración edáfica (mg de C-CO<sub>2</sub>/100 g de suelo/día). B) Actividad de la enzima β-glucosidasa (μg p-NF/g\*h). C) Actividad de la enzima β-glucosaminidasa (μg p-NF/g\*h). D) Actividad de la enzima deshidrogenada (μg p-TPF/g\*24h). E) Actividad de la enzima fosfatasa (μg p-NF/g\*h). La media, ± error estándar en rojo y n=27, para los tres sitios de muestreos: Coque, Fortuna y Cura

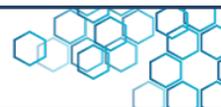


El resultado del análisis no paramétrico arrojó diferencias significativas entre los sitios con respecto a la respiración edáfica, con un valor de  $p = 0,00728$ . El resultado de la comparación múltiple de medias de contraste post-hoc de la prueba de Wilcoxon arrojó diferencias entre los sitios Coque y Cura con un valor de  $p = 0,02910$ , entre los sitios Coque y Fortuna con un valor de  $p = 0,029$ , y entre los sitios Cura y Fortuna con un valor de  $p = 0,02936$ .

Por lo tanto, es posible decir que existen diferencias estadísticamente significativas en la respiración entre los sitios. La cercanía al complejo CIJAA podría estar influenciando de manera negativa la respiración de los suelos circundantes al complejo [32, 33], debido a la emisión de contaminantes que podrían ser arrastrados a través de las deposiciones húmeda y seca en dichos suelos [32]. En los sitios más alejados, la mayor actividad microbiana del suelo podría explicarse debido a fuentes exógenas de materia orgánica lábil al suelo y la subsecuente estimulación de los microorganismos heterotróficos que estimulan la respiración edáfica [34-37].

Los resultados de la actividad enzimática entre los sitios muestran que la mayor actividad enzimática de las cuatro enzimas ( $\beta$ -glucosaminidasa,  $\beta$ -glucosidasa, deshidrogenasa y fosfatasa ácida) estuvo en los sitios más alejados del CIJAA, ver en la Figura 1B-E.

En general, la mayor actividad enzimática se obtuvo con la fosfatasa ácida para el sitio Cura ( $450 \mu\text{g} (p\text{-NF}) \text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), se observa en la Figura 1E. Por el contrario, la menor actividad enzimática se obtuvo con la deshidrogenasa, en el sitio Coque ( $17 \mu\text{g} (TPF) \text{g}^{-1} 24 \text{h}^{-1}$ ), como se demuestra en la Figura 1D. Esta misma tendencia se observó en el resto de las enzimas, en la Tabla 1, se presentan los valores de media,



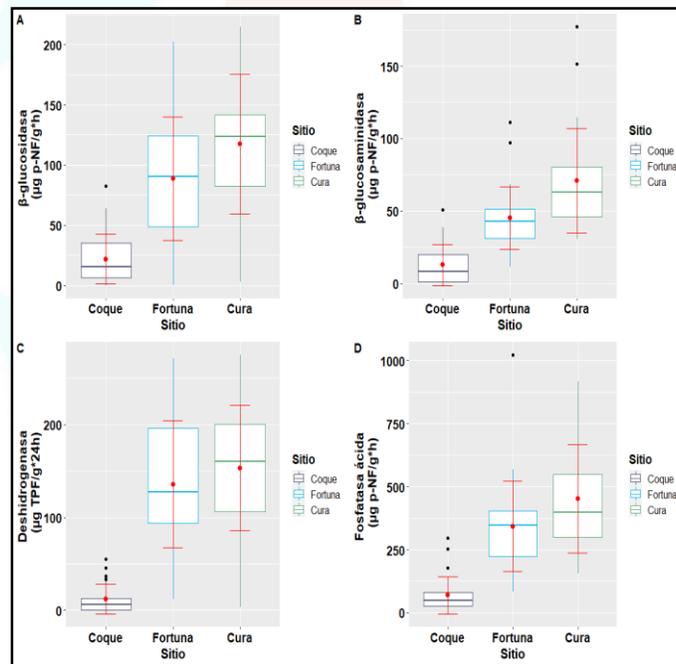
desviación estándar y error estándar por cada enzima. Así mismo, se muestran los valores de la respiración edáfica en cada sitio.

**Tabla 1.** Resumen de valores (media, sd, se) para las concentraciones de las emisiones CO<sub>2</sub> y la actividad enzimática en los tres sitios de muestreos: Coque, Fortuna y Cura

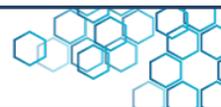
Sitio	mg CO <sub>2</sub> /100 g suelo (22 días)			β-glucosidasa (μg p-NF/g*h)			β-glucosaminidasa (μg p-NF/g*h)			Deshidrogenasa (μg TPF/g*24h)			Fosfatasa ácida (μg p-NF/g*h)		
	mean	sd	se	mean	sd	se	mean	sd	se	mean	sd	se	mean	sd	se
	<b>Fortuna</b>	152,00	7,87	3,93	88,63	51,07	9,83	45,23	21,44	4,13	135,68	180,11	13,13	342,93	180,11
<b>Cura</b>	290,00	9,12	4,56	117,46	58,1	11,18	70,92	35,85	6,90	153,23	214,69	13,00	452,64	214,69	41,32
<b>Coque</b>	71,50	1,29	0,64	21,99	20,76	4,00	12,76	14,09	2,71	11,87	74,22	3,07	68,51	74,22	14,28

En la Figura 2, se observa la representación de los diagramas de cajas por cada enzima para cada sitio. En general, el sitio Coque es distinto a Fortuna y Cura, con varianza diferente en cada enzima, también los sitios Fortuna y Cura son similares con varianza aproximadamente igual para cada enzima. Al comparar la actividad enzimática de la β-glucosidasa, se encontraron diferencias significativas entre los sitios  $p = 5,736 e^{-09}$ , entre Coque y Fortuna  $p = 2,1 e^{-06}$  siendo mayor en Fortuna, adicionalmente, entre Coque y Cura  $p = 1,2 e^{-07}$ , donde Cura fue mayor. Entre Fortuna y Cura no se observaron diferencias significativas  $p = 0,061$ . Así mismo, al comparar la actividad enzimática de la β-glucosaminidasa, se encontraron diferencias significativas entre todos los sitios  $p = 2,597 e^{-11}$  entre Coque y Fortuna  $p = 1,9 e^{-07}$  siendo mayor en Fortuna, entre Coque y Cura  $p = 5,97 e^{-09}$ , donde fue mayor Cura, y entre Fortuna y Cura  $p = 0,00081$  siendo Cura también mayor. Además, al comparar la actividad enzimática de la deshidrogenasa, diferencias significativas entre los sitios  $p = 2,477 e^{-11}$  aparecen, las diferencias encontradas están entre los sitios Coque

y Fortuna  $p = 2,8 e^{-09}$ , donde fue mayor en Fortuna, también, entre los sitios Coque y Cura  $p = 2,8 e^{-09}$  siendo mayor en el sitio Cura, y para esta enzima no se encontraron diferencias significativas entre los sitios Fortuna y Cura  $p = 0,39$ . Por último, al comparar la actividad enzimática de la fosfatasa ácida, se observaron diferencias significativas entre los sitios  $p = 1,785 e^{-11}$ , las diferencias encontradas están entre los sitios Coque y Fortuna  $p = 3,2 e^{-09}$  siendo mayor en el sitio Fortuna, así mismo, los sitios Coque y Cura  $p = 3,4 e^{-09}$  presentaron diferencias, siendo mayor la actividad enzimática en Cura.

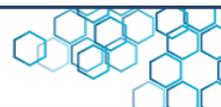


**Figura 2.** Diagramas de caja de cada enzima en los tres sitios de muestreo (Coque, Cura y Fortuna). A) Boxplots de la enzima  $\beta$ -glucosidasa ( $\mu\text{g p-NF/g}^*\text{h}$ ). B) Boxplots de la enzima  $\beta$ -glucosaminidasa ( $\mu\text{g p-NF/g}^*\text{h}$ ). C) Boxplots de la enzima deshidrogenada ( $\mu\text{g p-TPF/g}^*\text{24h}$ ). D) Boxplots de la enzima fosfatasa ( $\mu\text{g p-NF/g}^*\text{h}$ ). En rojo se observa la media y la desviación estándar.  $n=27$



Por otro lado, no se determinaron diferencias significativas entre los sitios Fortuna y Cura  $p = 0,59$ . Esta tendencia (menor actividad enzimática en los sitios cercanos al complejo), que puede observarse en la Figura 2, podría estar relacionada con las emisiones generadas por el CIJAA, ya que dichas emisiones podrían afectar a dos de los sitios estudiados: Coque y Fortuna, a diferencia del sitio Cura, en donde no se dispersan los contaminantes generados por el CIJAA [32], tal como ocurre en estudios de suelos en donde la actividad enzimática disminuye, en función de la distancia de los mismos a las carreteras o las fuentes de contaminación antrópicas [12, 15-17, 38].

Este escenario se reafirma con los resultados obtenidos en el permanova, donde se han considerado todas las enzimas para analizar las diferencias entre los sitios. Los resultados obtenidos reflejaron diferencias significativas entre los grupos (Sitio) con  $p=0,001$ , tal como lo refleja la Tabla 2, basados en matrices de distancias euclidianas a partir de datos previamente normalizados. También, se observó un efecto en la dispersión multivariada de los sitios, mostrados en la Tabla 3.

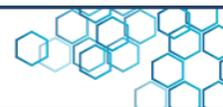


**Tabla 2.** Resultado del permanova

adonis2(enzy,2_norm,dist ~ Sitio, data = predictores, method = 'euclidean', permutations = 999)					
Permutation test for adonis under reduced model					
Terms added sequentially (first to last)					
Permutation: free					
Number of permutations: 999					
adonis2(formula = enzy,2_norm,dist ~ Sitio, data = predictores, permutations = 999, method = "euclidean")					
	Df	SumOfSqs	R2	F	Pr(>F)
Sitio	2	10,546	0,49908	38,857	0,001 ***
Residual	78	10,585	0,50092		
Total	80	21,131	1,00000		
---					
Signif, codes:					
0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

**Tabla 3.** Resultado de la permutación-dispersión

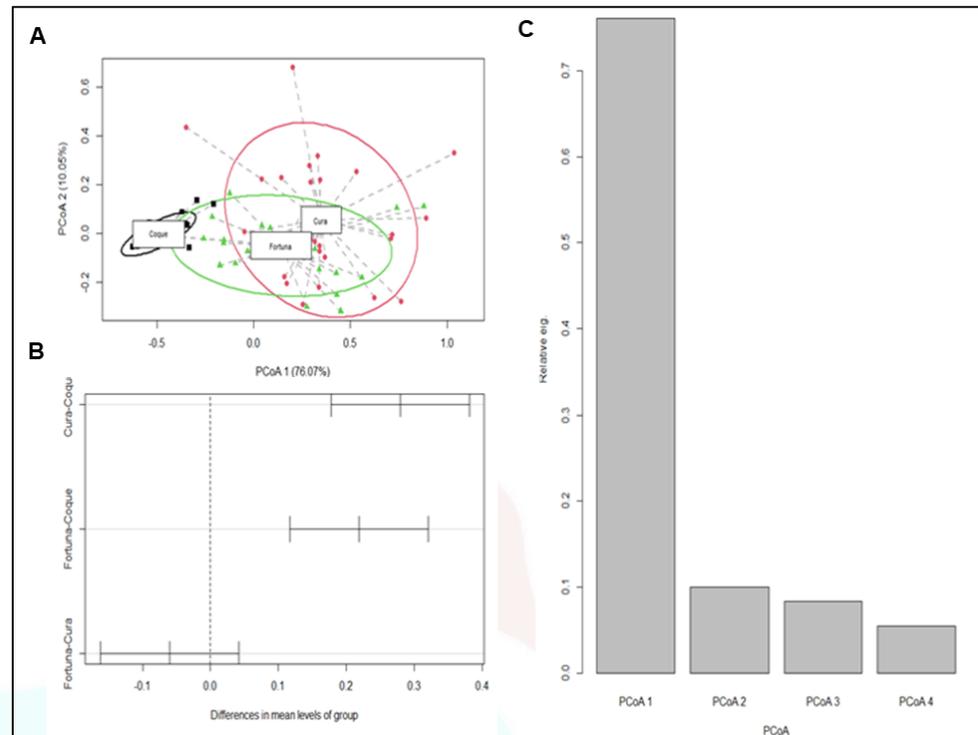
permdisp <- betadisper(enzy,2_norm,dist, group = predictores\$Sitio, type = "centroid")					
Homogeneity of multivariate dispersions					
Call: betadisper(d = enzy,2_norm,dist, group = predictores\$Sitio, type = "centroid")					
No. of Positive Eigenvalues: 4					
No. of Negative Eigenvalues: 0					
Average distance to centroid:					
Coque		Cura		Fortuna	
0,1382		0,4177		0,357	
Eigenvalues for PCoA axes:					
PCoA1		PCoA2		PCoA3	
16,077		2,124		1,772	
					PCoA4
					1,159



El resultado de la prueba de permutación (Permutest), para probar si uno o más sitios son más variables que otros, arrojó que el sitio Coque es diferente de los sitios Fortuna y Cura, en cuanto a la actividad enzimática. Cuando se permutan los residuos del permanova y se genera la distribución de permutación F, bajo la hipótesis nula de que no hay diferencia en la dispersión entre los grupos (Sitio), se encuentra que la actividad enzimática de Coque es diferente al de Fortuna y Cura, siendo menor en este sitio, en comparación a los grupos más alejados del CIJAA. Sin embargo, se reportó que no se encontraron diferencias significativas entre los sitios Fortuna y Cura, como se puede observar en la Tabla 4 y Figura 3. La ordenación del PCoA para los sitios se obtuvo a partir de 4 ejes de coordenadas principales, que explican el 86,12 % de la variación total.

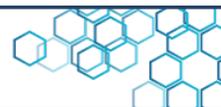
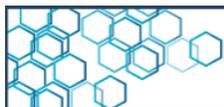
**Tabla 4.** Resultado de la prueba de la dispersión multivariada, permtest

permtest <- permutest(permdisp, pairwise = TRUE, permutations = 999)							
Permtest							
Permutation test for homogeneity of multivariate							
Dispersions							
Permutation: free							
Number of permutations: 999							
Response: Distances							
Df Sum Sq Mean Sq F N,Perm Pr(>F)							
Groups	2	1,1670	0,58352	23,741	999	0,001	***
Residuals				78	1,9171	0,02458	
---							
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1							
Pairwise comparis							
(Observed p-value below diagonal, permuted p-value above diagonal)							
	<b>Coque</b>	<b>Cura</b>	<b>Fortuna</b>				
<b>Coque</b>		1,0000e-03	0,001				
<b>Cura</b>	3,6622e-09		0,258				
<b>Fortuna</b>	2,0858e-07		2,3608e-01				



**Figura 3.** Representación gráfica de: A) Dispersión de cada grupo, B) Varianza explicada en cada eje, con intervalo de confianza al 95 % y C) Varianza explicada total (resultado de la prueba gráfica de Tukey entre cada grupo)

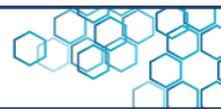
La fuerza de la asociación entre la ordenación multivariada con la hipótesis de diferencias entre sitios de los dos primeros ejes canónicos, empleando el método euclidiano, fue de 0,7607 en el PCoA 1 y 0,1005 en el PCoA 2, como se muestra en la Figura 3A-C. En este sentido, los resultados sugieren que con la cercanía al complejo decrece la actividad enzimática asociada a los ciclos del C, N y P. Además, las emisiones de contaminantes del CIJAA podrían contribuir en la disminución de la actividad asociada a la presencia de microorganismos (hongos y bacterias) responsables de la oxidación de nutrientes esenciales del suelo, como ha sido reportado en otros trabajos



[5, 12, 39, 40]. Con la cercanía al complejo, la descomposición de los carbohidratos de bajo peso molecular y sus productos de hidrólisis que son la principal fuente de energía para los microorganismos del suelo a través de las enzimas  $\beta$ -glucosaminidasa,  $\beta$ -glucosidasa pueden verse afectados [41], también, la mineralización del fósforo orgánico del suelo cuando la actividad de la fosfatasa ácida disminuye [41]. La actividad microbiana general (la respiración edáfica, la actividad de la deshidrogenasa), así como la actividad microbiana específica ( $\beta$ -glucosaminidasa,  $\beta$ -glucosidasa, fosfatasa ácida), pueden ser usadas para dar una evaluación de la buena salud en el ecosistema de los suelos cuando se considera la microbiología del suelo [42]. En este sentido, este estudio muestra que los suelos con mayor actividad enzimática y mayor respiración edáfica y, en consecuencia, los más saludables corresponden al sitio Cura, seguido de Fortuna y, por último, los menos saludables y con menor calidad, a los suelos del sitio Coque.

#### 4. Conclusiones

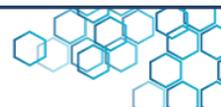
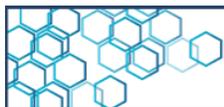
La respiración edáfica (mg de C-CO<sub>2</sub>/100 g de suelo /día) y la actividad enzimática de la  $\beta$ -glucosaminidasa,  $\beta$ -glucosidasa, deshidrogenasa y fosfatasa ácida aumentaron con la distancia al complejo, siendo mayor en Cura (a 40 km del CIJAA), seguido de Fortuna (a 9 km del CIJAA) y Coque (a 1,3 km del CIJAA). La cercanía al complejo CIJAA podría estar influenciando de manera negativa tanto la respiración como la actividad enzimática, ya que se registró a los 22 días de incubación valores de mg de C-CO<sub>2</sub>/100 g de suelo/día por debajo de 100 en el sitio más cercano (Coque) y mayor de 250 en el sitio más alejado (Cura),



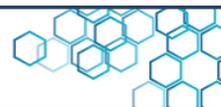
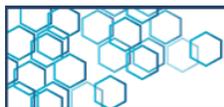
encontrándose un valor promedio en el sitio Fortuna. La mayor actividad enzimática se obtuvo con la fosfatasa ácida, para el sitio Cura ( $450 \mu\text{g} (p\text{-NF}) \text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), por el contrario, la menor actividad enzimática fue con la deshidrogenasa, en el sitio Coque ( $17 \mu\text{g} (TPF) \text{g}^{-1} 24 \text{h}^{-1}$ ). Esta misma tendencia se observó en el resto de las enzimas de los suelos circundantes al CIJJA. La emisión de contaminantes del complejo a la atmósfera y su consecuente deposición sobre los bosques, podrían afectar negativamente a los microorganismos del suelo y, por lo tanto, a las propiedades biológicas de los mismos. En ese sentido, son necesarios más estudios de fisicoquímica y actividad microbiana en estos suelos, para tener una mejor comprensión de los mecanismos involucrados en la respiración y en la actividad enzimática, del mismo modo, como estos se ven afectados por la cercanía al Complejo Industrial José Antonio Anzoátegui.

## 5. Referencias

- [1] D. Bello, C. Trasar-Cepeda, F. Gil-Sotres. Enzymes and Environmental Contaminants Significant to Agricultural Sciences. OMICS Group. 2014.
- [2] L. Rincón, L. Melgarejo. Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. Acta Biológica Colombiana, 10:1, 5-18, 2005.
- [3] C. Trasar-Cepeda, M. Leiros, S. Seoane, F. Gil-Sotres. Limitations of Soil Enzymes as Indicators of Soil Pollution. Soil Biology and Biochemistry, 32, 1867-1875, 2000.



- [4] V. Ochoa, B. Hinojosa, B. Gómez-Muñoz, R. García-Ruiz. Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Iniciación a la investigación*. 2, 2010.
- [5] P. Nannipieri, C. Trasar-Cepeda, R. Dick. Soil Enzyme Activity: A Brief History and Biochemistry as a Basis for Appropriate Interpretations and Meta-Analysis. *Biology and Fertility of Soils*. 54, 11-9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1245-6>.
- [6] E. Wolejko, A. Jabłońska-Trypuć A, U. Wydro, A. Butarewicz, B. Łozowicka. Soil Biological Activity as an Indicator of Soil Pollution with Pesticides - A Review. *Applied Soil Ecology*. 147, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.006>.
- [7] J. Pascual, C. García, T. Hernández, J. Moreno, M. Ros. Soil Microbial Activity as a Biomarker of Degradation and Remediation Processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1877-1883, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00161-9)
- [8] T. Knight. Differentiating Microbial and Stabilized  $\beta$ -glucosidase Activity Relative to Soil Quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(12), 2089-2096, 2004.
- [9] Y. Acosta, J. Paolini. Actividad de la enzima deshidrogenasa en un suelo Calciorthids enmendado con residuos orgánicos. *Agronomía tropical*, 55(2), 217-232, 2005.
- [10] J. Parham, S.P. Deng. Detection, Quantification and Characterization of  $\beta$ -glucosaminidase Activity in Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 8-9, 1183-1190, 2000.
- [11] A. Adetunji, F. Lewu F, R. Mulidzi, B. Ncube. The Biological Activities of  $\beta$ -glucosidase, Phosphatase and Urease as Soil Quality Indicators: A Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 794-807 2017.
- [12] H. Jaworska, J. Lemanowicz. Heavy Metal Contents and Enzymatic Activity in Soils Exposed to the Impact of Road Traffic. *Sci Rep* 9, 19981, 2019. <https://doi.org/10.1038/S41598-019-56418-7>.
- [13] D. Powlson, P. Prookes, B. Christensen. Measurement of Soil Microbial Biomass Provides an Early Indication of Changes in Total Soil



Organic Matter Due to Straw Incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(2), 159-164, 1987.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90076-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90076-9)

[14] W. Dick, M. Tabatabai. Significance and Potential Uses of Soil Enzymes. *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management*. Metting, F. B., Jr. Pp: 95-127, 1992.

[15] S. Deng, M. Tabatabai. Effect of Tillage and Residue Management on Enzyme Activities in Soils: III. Phosphatases and Arylsulfatase. *Biology Fertility and Soils*, 24,141-6, 1997.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/S003740050222>.

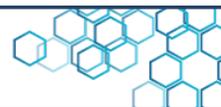
[16] D. Allen, B. Singh. Soil Health Indicators Under Climate Change: A Review of Current Knowledge, 25-45, 2011.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20256-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20256-8_2).

[17] Z. Xu, T. Zhang, S. Wang, Z. Wang. Soil pH and C/N Ratio Determines Spatial Variations in Soil Microbial Communities and Enzymatic Activities of the Agricultural Ecosystems in Northeast China: Jilin Province case. *Applied Soil Ecology*, 55:103629, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2020.103629>.

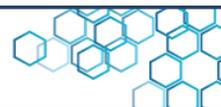
[18] C. Garbisu, I. Alkorta. Assessment of Soil Quality Using Microbial Properties and Attributes of Ecological Relevance. *Applied Soil Ecology*, 49(1), 1-4, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.018>

[19] M. Cycon, Z. Piotrowska-Seget. Pyrethroid-Degrading Microorganisms and their Potential for the Bioremediation of Contaminated Soils: A Review. *Frontiers Microbiology*, 7, 1463, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.3389/FMICB.2016.01463/FULL>.

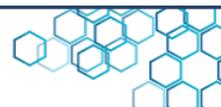
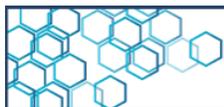
[20] L. Cerón-Rincón, L. Marina, M. Muñoz. Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana*, vol. 10, núm. 1, 2005, pp.5-18. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Colombia.



- [21] S. Noinville, M. Revault, H. Quiquampoix, M. Baron. Structural Effects of Drying and Rehydration for Enzymes in Soils: A Kinetics-FTIR Analysis of  $\alpha$ -chymotrypsin Adsorbed on Montmorillonite. *J. Colloid Interface Sci.* 273(2), 414-425, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.01.067>
- [22] R. Burns. Enzyme Activity in Soil: Location and a Possible Role in Microbial Ecology. *Soil Biology and Biochemistry*, 14(5), 423-427, 1982.
- [23] J. Sarkar, A. Leonowicz. Immobilization of Enzymes on Clays and Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(2), 223-230, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90098-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90098-9)
- [24] A. Araújo, R. Monteiro. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*. 23, 66-75, 2007.
- [25] S. Sharma, A. Ramesh, M. Sharma. Microbial Community Structure and Diversity as Indicators for Evaluating Soil Quality. *Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture*, 317-58, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9513-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9513-8_11).
- [26] W. Durango, L. Uribe, C. Henríquez, R. Mata. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 37-46, 2015.
- [27] L. Gianfreda, M. Rao. Potential of Extra Cellular Enzymes in Remediation of Polluted Soils: A Review. *Enzyme and Microbial Technology*, 35(4), 339-354, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.05.006>
- [28] G. Stotzky. Microbial Respiration. *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, 1550-72, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/AGRONMONOGR9.2.C62>
- [29] M. Tabatabai, J. Bremner. Use of p-nitrophenyl Phosphate for Assay of Soil Phosphatase Activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1(4), 301-307, 1969. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1)
- [30] Jr. Casida, D. Klein, T. Santoro. Soil Dehydrogenase Activity. *Soil Science*: 98(6), 371-376, 1964.



- [31] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing 2022.
- [32] G. Rincón, L. Cremades. Assessment of Responsibility for Pollution from PM10 and Sulfur Dioxide and Application to an Industrial Area on the Northeastern Coast of Venezuela. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 722-32, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.02.0023>.
- [33] G. Rincón-Polo. Análisis integrado de la calidad del aire en la costa nororiental de Venezuela. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Licenciado en Geoquímica. Venezuela. Universidad Central de Venezuela. 2010.
- [34] W. Bettiol, R. Ghini, J. Abrahão, H. Galvão, M. Antônio, V. Ligo, et al. Soil Organisms in Organic and Conventional Cropping Systems. *Soils and Plant Nutritions, Scientia Agricola*, 59 (3), 565-572, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000300023>
- [35] A. Araújo, V. Santos. Responses of Soil Microbial Biomass and Activity for Practices of Organic and Conventional Farming Systems in Piauí State, Brazil. *European Journal of Soil Biology*, 44(2), 225-230 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.06.001>
- [36] P. Saffigna, D. Influence of Sorghum Residues and Tillage on Soil Organic Matter and Soil Microbial Biomass in an Australian Vertisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(6), 759-765, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90167-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90167-3)
- [37] N. Okur, H. Kayikcioglu, F. Ates, B. Yagmur. A Comparison of Soil Quality and Yield Parameters Under Organic and Conventional Vineyard Systems in Mediterranean Conditions (West Turkey). *Biological Agriculture and Horticulture*, 32, 73- 84, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/01448765.2015.1033645>.
- [38] S. Joshi, R. Kumar, P. Saikia, R. Bhagobaty, S. Thokchom. Impact of Roadside Pollution on Microbial Activities in Sub-Tropical Forest Soil of North East India. *Res. J. Environ. Sci*, 4, 280-287, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3923/RJES.2010.280.287>.



[39] H. Aponte, P. Meli, B. Butler, J. Paolini, F. Matus, C. Merino, et al. Meta-Analysis of Heavy Metal Effects on Soil Enzyme Activities. *Science of the Total Environment*, 737-744, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139744>.

[40] A. Markowicz, M. Cycon, S. Piotrowska. Microbial Community Structure and Diversity in Long-Term Hydrocarbon and Heavy Metal Contaminated Soils. *Int. J. Environ. Res*, 10, 321-32, 2016.

[41] M. Ekenler. Enzyme Activities in Soils as Affected by Management Practices. Degree of Doctor of Philosophy. Iowa. Iowa State University. 2002.

[42] M. Ruiz-Dager, J. Paolini-Gomez. Indicadores biológicos de suelos lacustres y aluviales de Venezuela bajo diferentes usos. Parte 2. Evaluación de la calidad de suelos. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.28940/TERRA.V40I0.967>.