

**Evaluación del tiempo y calidad del compost obtenido a partir de una mezcla de residuos sólidos orgánicos con o sin adición de *Saccharomyces Cerevisiae***

**Evaluation of the time and quality of the compost obtained from a mixture of organic solid waste with or without addition of *Saccharomyces Cerevisiae***

Eliana Mullisaca Contreras  
*e.mullisaca@unaj.edu.pe* – Universidad Nacional de Juliaca  
<https://orcid.org/0000-0002-0555-2459>

Benito Hugo Fernández Ochoa  
*bhfernandez@unap.edu.pe* – Universidad Nacional del Altiplano  
<https://orcid.org/0000-0003-4360-435X>

Cedidec García Espinoza  
*c.garciae@unaj.edu.pe* – Universidad Nacional de Juliaca  
<https://orcid.org/0000-0001-60185711>

Alejandro Félix Taquire Arroyo  
*taquirearroyo@gmail.com* – Universidad Nacional de Juliaca  
<https://orcid.org/0000-0001-6552-5228>

Washington Miguel Soncco Vilcapaza  
*wm.sonccov@unaj.edu.pe* – Universidad Nacional de Juliaca  
[https:// orcid.org/0000-0003-2385-1820](https://orcid.org/0000-0003-2385-1820)

Recibido el 24/04/23 | Aceptado el 10/05/23

DOI: <https://doi.org/10.47190/nric.v4i2.245>

### Resumen

El compostaje es uno de los métodos con mayor aplicación para el aprovechamiento de los residuos vegetales. Sin embargo, su aplicación no ha sido efectiva por el tiempo de degradación de los residuos vegetales. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del inóculo *Saccharomyces cerevisiae* en el tiempo y la calidad del compost obtenido a partir de una mezcla de residuos orgánicos. La metodología desarrollo dos etapas, en la primera se determinó el contenido de carbono y nitrógeno por los métodos Walkley Black y Kjendahl respectivamente; ello a fin obtener una mezcla de residuos con relación C/N en el rango de 20-30, se realizó 8 experimentos combinando niveles superiores con inferiores (+1 y -1) de las variables relación C/N inicial(20-30), inóculo *Saccharomyces cerevisiae* (0.05-0.10) y humedad(40-60%); en los que se evaluó el tiempo de activación de los microorganismos, para lo cual se empleó el recuento de placas, en la segunda etapa se preparó dos tratamiento: uno con los valores de las variables(I-H-C/N) que permitieron obtener menor tiempo de activación y otro en las mismas condiciones pero sin adición de inóculo, en ambos tratamientos se evaluó el tiempo de compostaje y la calidad del compost. Los resultados mostraron que la mezcla de residuos con I=0.10%, H=60% y relación C/N=20 fue la que menor tiempo de activación presento (10.33h), a comparación del resto de tratamientos; y en cuanto al tiempo de compostaje y calidad del compost este tratamiento presento menor tiempo de compostaje (27 días) y mejor calidad (16.01); concluyéndose que la adición de *Saccharomyces cerevisiae* en el proceso inicial de compostaje afecta positivamente en el tiempo de compostaje y calidad del producto.

**Palabras clave:** *Inoculo, Relación C/N, Residuos vegetales, Saccharomyces cerevisiae, Tiempo.*

**Como citar:** Mullisaca-Contreras, E., Fernández-Ochoa, B.H., García-Espinoza, C., Taquire-Arroyo, A.F. & Soncco-Vilcapaza, W.M. (2023). Evaluación del tiempo y calidad del compost obtenido a partir de una mezcla de residuos sólidos orgánicos con o sin adición de *Saccharomyces Cerevisiae*. ÑAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías, 4(2), 81-86.

## Abstract

Composting is one of the most widely applied methods for the use of vegetable waste. However, its application has not been effective due to the degradation time of plant residues. The objective of this work was to evaluate the effect of the *Saccharomyces cerevisiae* inoculum on the time and quality of the compost obtained from a mixture of organic waste. The methodology developed two stages, in the first the carbon and nitrogen content was determined by the Walkley Black and Kjendahl methods respectively; In order to obtain a mixture of residues with a C/N ratio in the range of 20-30, eight experiments were carried out combining higher and lower levels (+1 and -1) of the initial C/N ratio variables (20-30), inoculum *Saccharomyces cerevisiae* (0.05-0.10) and humidity (40-60%); in which the activation time of the microorganisms was evaluated, for which the plate count was used, in the second stage two treatments were prepared: one with the values of the variables (I-H-C/N) that allowed obtaining less time of activation and another in the same conditions but without addition of inoculum, in both treatments the composting time and the quality of the compost were evaluated. The results showed that the mixture of residues with I=0.10%, H=60% and C/N=20 ratio was the one with the shortest activation time (10.33h), compared to the rest of the treatments; and in terms of composting time and compost quality, this treatment presented shorter composting time (27 days) and better quality (16.01); concluding that the addition of *Saccharomyces cerevisiae* in the initial composting process positively affects the composting time and product quality.

**Keywords:** *Inoculum, C/N ratio, Plant residues, Saccharomyces cerevisiae, Time.*

## Introducción

El compostaje es una de las tecnologías de mayor aplicación (Sundberg & Navia, 2014) en el tratamiento de los residuos sólidos, el proceso consiste en la descomposición de la biomasa vegetal (celulosa, hemicelulosa, lignina y aminoácidos), realizada por una sucesión de poblaciones microbianas aerobias como hongos, bacterias y actinomicetos, los mismos que desarrollan un proceso óptimo bajo determinadas condiciones de pH, aireación, tamaño de partícula, nutriente, humedad (40-60%) y relación C/N(20-30), valores altos de la variable ocasionaría largos periodos de descomposición, de la misma forma la cantidad deficiente de microorganismos en la composta produciría una reducción en la eficiencia del compostaje y una calidad indeseada del compost (Xu, Lu, Shan, He, & Huang, 2019).

Como se mencionó anteriormente el compostaje es un procesos en el cual participan hongos, actinomicetos y bacterias en las fases mesófilas y termófilas respectivamente (Vasquez-Castro E., 2021), siendo los hongos los organismos que presentan gran eficiencia en la degradación de celulosa y quitina, mientras que las bacterias degradan materia lignocelulolítica (Holman, Xiyang Hao, & Hee Eun Yang, 2016) pero cabe resaltar que la cantidad de los organismos influye puede provocar una reducción de la eficiencia del compostaje y una calidad no deseada del compost (Beidou Xi, 2015). En tal sentido se hace necesario la búsqueda de microorganismos con alta capacidad degradadora; ya que se asume que el proceso de compostaje puede ser acelerado incrementando la cantidad de microorganismos (Camacho, 2014).

En tal situación el uso de inoculantes representa una estrategia potencial para incrementar la cantidad de microorganismos que aceleren la descomposición de los residuos vegetales especialmente lignocelulósicos promoviendo la humificación (Chih Ping Chi, 2020), dentro de los que destaca la levadura *Sacharomyces cereviceare*, cuya función en el compostaje es disminuir el tiempo de degradación de los

polisacáridos mediante procesos enzimáticos (celulasas, hemicelulosas y ligninas), además de convertir los aminoácidos y carbohidratos en sustancias antimicrobiales necesarios para eliminar microorganismos patógenos presente en los residuos vegetales (Piñeros-Castro, 2014). El presente estudio tuvo por objetivo evaluar el tiempo y calidad del compost obtenido de una mezcla de residuos sólidos orgánicos con o sin adición de (*Saccharomyces cerevisiae*).

## Materiales y métodos

### Análisis fisicoquímico

Para el análisis físico químico, primero inició con la preparación del material vegetal y estiércol, estos fueron sometidos a selección, secado y reducción de tamaño hasta diámetros menores a 20 mm y 4 mm respectivamente; seguidamente se procedió con la determinación de pH relación C/N y humedad, mediante los métodos potenciométrico, Walkley Black, Kjendahl y diferencias de peso respectivamente.

### pH

El pH se determinó con un pH meter electrónico marca HANNA modelo pH211, el instrumento fue calibrado con soluciones buffer pH 7 y 4, el método fue el aplicado por Millán Fernando, (2018) el cual consistió en pesar 10 g de residuos mezclados en una relación de 1:10, las muestras fueron agitadas durante 15 minutos y después se dejaron reposar por 5 minutos más, procediendo a centrifugar a 1600 rpm durante 5 minutos.

### Relación C/N

El Carbono orgánico fue determinado por oxidación húmeda denominado Walkley y Black (Izquierdo Bautista, 2021), el cual consiste en pesar 0,5 g y colocar en un vaso de precipitado añadiendo a este 10 mL de una solución 1 N de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), agitar cuidadosamente y después de 45 minutos se agregó agua destilada y 3 gotas de indicador ortofenantrolina, se procede con la titulación del exceso de  $Cr^{+6}$  con la sal de Mohr ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) 0,5 N; el viraje de color del

verde oscuro al rojo indica el punto final de la titulación.

$$\%CO = \frac{(B-M) \times N \times 0.003 \times (100 + pW)}{Wm}$$

Donde:

M=volumen de solución titulante empleada en la muestra en ml,  
 B=volumen de solución titulante empleada en el blanco en ml,  
 N=Normalidad del sulfato ferroso en eq.l-1, pW es el % (fracción masa)  
 Wm =peso de la muestra en gramos

La determinación de Nitrógeno se realizó aplicando el método Kjendahl descrito por Fernandez L., (2006), el cual consiste en digerir 2 gramos de residuos vegetales dispuestos en un matraz Kjendahl, al cual se adiciona 2gr de catalizador y 5 ml de ácido sulfúrico concentrado, pasado el tiempo de la digestión el residuo es mezclado con solución de hidróxido de sodio al 10 N y sometido a destilación. El residuo es recogido en un vaso de precipitado de 100 ml conteniendo 10 mL de solución de ácido bórico, el residuo es titulado con solución de ácido sulfúrico 0.01N hasta vire de color (verde a rosado fuerte). Preparar un blanco y realizar la misma metodología. El cálculo de la concentración de nitrógeno se realiza con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\%N = \frac{(T-B) \times N \times 1.4}{S}$$

Donde:

T=mL de ácido sulfúrico gastados en la muestra  
 B=mL de ácido sulfúrico gastados en el blanco  
 N=Normalidad del ácido sulfúrico  
 S=Peso de muestra

**Preparación de la mezcla**

Los residuos vegetales y estiércol fueron mezclados hasta llegar a la relación C/N (20-30) con cantidades calculadas según la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{N} \text{ deseada} = \frac{C \text{ en } 1 \text{ kg de materia rica en Carbono} + x(C \text{ en } 1 \text{ kg de materia rica en Nitrógeno})}{N \text{ en } 1 \text{ kg de materia rica en Carbono} + x(N \text{ en } 1 \text{ kg de materia rica en Nitrógeno})}$$

Donde:

X= Kg de peso seco de materia rica en Nitrógeno necesaria para los kg de peso seco de materia rica en Carbono.

El proceso se realizó en cámaras de vidrio 60 cm de largo, 50 cm de ancho y 50cm de alto en lo que se incorporaron los 10 kg de residuos vegetales. Se formó 8 experimentos combinando niveles superiores con inferiores (+1 y -1) de las variables relación C/N inicial (20-30), inóculo *Saccharomyces cerevisiae* (0.05-0.10) y humedad (40-60%). Además, se realizó la adecuación del pH de cada una de las mezclas con solución de ácido cítrico hasta llegar a un rango de 4.5 a 5.5 ello con la finalidad de otorgar condiciones idóneas para la activación del proceso de compostaje con *Saccharomyces cerevisiae*.

**Efecto del inóculo**

Para evaluar el efecto del inóculo en el tiempo de activación del proceso de compostaje se hizo necesario el control cuantitativo de bacterias en cada uno de los 8 tratamientos formulados según el diseño experimental, siendo estos cuantificados por el método recuento en placas (UFC/mL). El resultado obtenido fue comparado con un tratamiento control preparado sin adición de inóculo.

**Análisis de datos**

El diseño experimental usado para el presente estudio fue el aleatorio completamente al azar, donde se evaluó el efecto de las interacciones concentración de inóculo, humedad y relación C/N sobre el tiempo de activación del compostaje; los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y una comparación de medias con Tukey.

**Resultados y discusión**

Los tiempos de activación en el proceso de compostaje según los 8 tratamientos dispuestos según el diseño aleatorio completamente al azar son observados en la tabla 1:

Tabla 1  
 Tiempo de activación en el proceso de compostaje con inóculo

Tratamiento	MODELO MATEMÁTICO: Análisis de regresión polinómica			
I-H-C/N	Bacterias= a(tiempo) <sup>3</sup> +b(tiempo) <sup>2</sup> +c (tiempo)+d	Coef. Determinación	Tiempo de activación (h)	Bacterias (UFC/mL)
0.05-40-20	y = -0.9141x <sup>3</sup> + 20.359x <sup>2</sup> - 22.824x + 105.45	R <sup>2</sup> = 0.9245	14.27	1269.284031.x.10 <sup>6</sup>
0.10-40-20	y = -0.1498x <sup>3</sup> + 5.345x <sup>2</sup> - 26.035x + 85.437	R <sup>2</sup> = 0.6278	21.17	508.476026 x 10 <sup>6</sup>
0.05-60-20	y = -0.7234x <sup>3</sup> + 12.909x <sup>2</sup> + 40.112x + 21.056	R <sup>2</sup> = 0.9302	13.30	1136.490788x10 <sup>6</sup>
0.10-60-20	y = -2.5888x <sup>3</sup> + 43.748x <sup>2</sup> - 78.914x + 129.577	R <sup>2</sup> = 0.7888	10.33	1129.054494 x 10 <sup>6</sup>
0.05-40-30	y=-0.5543x <sup>3</sup> + 16.757x <sup>2</sup> -67.951x+ 135.39	R <sup>2</sup> 0.9126	17.87	1109.093175 x10 <sup>5</sup>
0.10-40-30	y = -0.5082x <sup>3</sup> + 17.471x <sup>2</sup> - 121.027x+ 244.463	R <sup>2</sup> = 0.5487	18.70	767.469125 x 10 <sup>5</sup>
0.05-60-30	y = -0.6687x <sup>3</sup> + 23.167x <sup>2</sup> - 172.643x + 203.01	R <sup>2</sup> = 0.5335	18.40	704.761995 x10 <sup>5</sup>
0.10-60-30	y = -0.5804.X <sup>3</sup> + 18J264x <sup>2</sup> - 103.169x+ 124.103	R <sup>2</sup> = 0.4862	17.67	801.539461 x10 <sup>5</sup>

La tabla 1 muestra la interacción óptima de variables I-H-C/N (0.10-60 -20) con menor tiempo de activación 10.33 horas, demostrado con la prueba de especificidad de Tukey (Tabla 3) que indica que el tratamiento con grado de significancia "a" obtuvo un menor tiempo de activación (10.33 horas), superando estadísticamente a los demás tratamientos; en cuanto al análisis de varianza ANOVA (95%) (Tabla 2) demuestra que las variables C/N y H resultan ser altamente significativa en el tiempo de activación en el proceso de compostaje con inoculo.

Tabla 2. Análisis de varianza ANOVA de la interacción de variables C/N, concentración de inóculo y humedad.

FV	GL	SC	CM	Fe	P	Significancia
Tratamiento	7	260.103	37.158	201.305	0.00000000	p<0.05
C/N(1)	1	69.0204167	69.0204167	373.9255	1.60796 x 10 <sup>-12</sup>	p<0.05
Humedad (2)	1	56.73375	56.73375	307.3612	7.2165 x 10 <sup>-12</sup>	p<0.05
inoculo (3)	1	6.10041667	6.10041667	33.04966	2.98986 x 10 <sup>-5</sup>	p<0.05
1 por 2	1	47.88375	47.88375	259.4153	2.61621 x 10 <sup>-11</sup>	p<0.05
1 por 3	1	5.51041667	5.51041667	29.85327	5.20133 x 10 <sup>-5</sup>	p<0.05
2 por 3	1	49.0204167	49.0204167	265.5734	2.19072 x 10 <sup>-11</sup>	p<0.05
1 por 2 por 3	1	25.83375	25.83375	139.9571	2.52814 x 10 <sup>-9</sup>	p<0.05
Error	16	2.95333333	0.18458333			
Total	23	263.05625				

Tabla 3. Prueba de Especificidad de Tukey

N°	I-H-C/N	Media	Significancia
1	0.10-60-20	10.33	a
2	0.05-60-20	13.30	b
3	0.05-40-20	14.27	b c
4	0.10-60-30	17.67	d
5	0.05-40-30	17.87	dc
6	0,05-60-30	18.40	d c f
7	0.10-40-30	18.70	d c f g
8	0.10-40-20	21.17	

En la tabla 4 y figura 1a se observa el efecto del inóculo *Saccharomyces cerevisiae* en el tiempo de activación comparado con el tratamiento control (figura 1b), en la cual se observa una variación entre ambos procesos; en cuanto a la carga microbiana fue elevada en el tratamiento realizado con inoculo, estos resultados son concordantes con De la Peña (2020), quien manifiesta que la cantidad de inoculo añadida al inicio del proceso influye positivamente en el tiempo de activación, lo cual se asemeja lo reportado por Rivera, et al., (2020), quienes reportan que la cantidad de *Saccharomyces cerevisiae* aplicada en el proceso de compostaje definen la velocidad y el tiempo de degradación del material orgánico, en este entender se podría manifestar que la cantidad de microorganismos adicionados a los residuos vegetales en la fase mesofílica está en relación directa con el tiempo de activación de los microorganismos, lo cual influiría positivamente en el proceso de compostaje.

Tabla 4. Efecto del inóculo *Saccharomyces cerevisiae* en el tiempo de activación del proceso de compostaje.

Tratamiento	MODELO MATEMÁTICO: Análisis de regresión polinómica	Coef.	Tiempo activación	Bacterias 10 <sup>-6</sup>
I-H-C/N	Bacteria= a(tiempo) <sup>3</sup> +b (tiempo) <sup>2</sup> +c (tiempo)+d			
0.10-60-20	y = -2.5888x <sup>3</sup> + 43.748x <sup>2</sup> - 78.914x + 129.577	R <sup>2</sup> = 0.7899	10.33	1129.054494
0-60-20	y = -0.0608x <sup>3</sup> + 3.1569x <sup>2</sup> - 26.1497x + 58.468	R <sup>2</sup> = 0.9245	29.90	473.653479

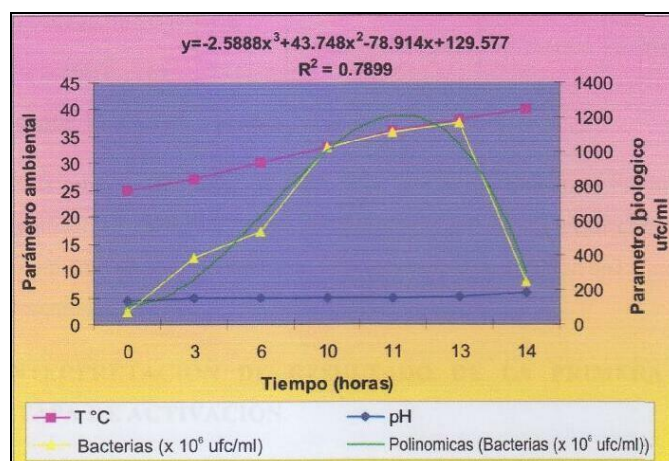


Figura. 1a: Tiempo de activación en el proceso de compostaje con adición de inóculo *Saccharomyces cerevisiae*.

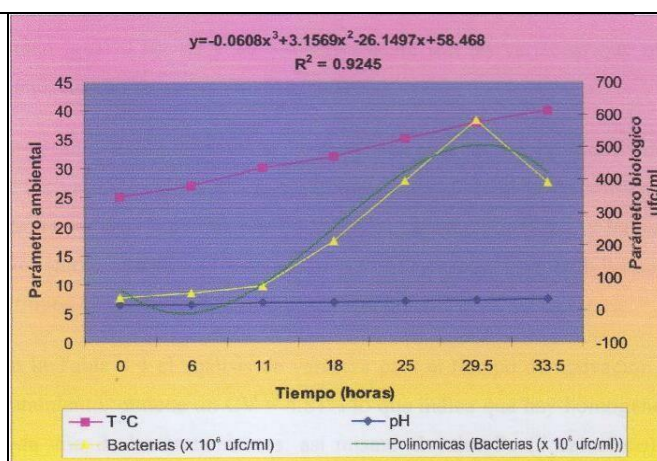


Figura. 1b: Tiempo de activación en el proceso de compostaje sin adición de inóculo *Saccharomyces cerevisiae*.

Tabla 5  
Tiempo de compostaje en los tratamientos con y sin adición de inóculo.

Tratamiento	Repeticiones (Días)			Y1 Días
	R1	R2	Ra	
Con Inoculo	26.5	27.0	27.50	27.0
Sin Inoculo	49.0	48.0	49.0	48.7

Tabla 6  
Registro de la calidad del compost en cada tratamiento.

Tratamiento	Repeticiones (C/N)			Y2 C/N
	R1	R2	R3	
Con Inoculo	16.00	14.88	17.15	16.01
Sin Inoculo	19.64	19.37	19.25	19.42

Las tablas 5 y 6 muestran que el inóculo *Saccharomyces cerevicere* aplicado ejercen efecto en el tiempo de compostaje y la calidad del compost, ya que los resultados muestran el tiempo de compostaje de 27 días a comparación del tratamiento control, ante ello Sarkar et al. (2010) manifestaron que la inoculación mejora la actividad biológica en el proceso y disminuye el tiempo de compostaje; en cuanto a la calidad del compost procesado con inóculo se observó que este decreció con el tiempo de compostaje presentando valores de 16.01; ante este resultado Tortarola et al.,(2008) refiere que relaciones C/N>14 son características de los compost maduro. Los resultados de la presente investigación coinciden con lo reportado por Zhang et al., (2021) quienes mencionan que la aplicación de comunidades bacterias durante el compostaje mejora la calidad y la eficiencia del proceso realizado con especies vegetales.

Entonces estimamos que la bioaumentación en el proceso de compostaje afectó el tiempo de activación de los microorganismos y el tiempo para alcanzar la madurez del compost, ello debido a la acción hidrolítica y enzimática de la *Saccharomyces cerevicere* (celulasa, hemicelulosa y ligninasas) (Tortarola et al.,2008), que degrada la celulosa y las hemicelulosas, lo cual causa modificaciones en la relación C/N, ya que el contenido de nitrógeno aumenta mientras que la masa vegetal disminuye.

### Conclusión

La inoculación de *Saccharomyces cerevicere* en la etapa inicial del proceso de compostaje permitió la activación del proceso, lo cual se dio en 10.33 horas, a comparación de los tratamiento sin inóculo, de la misma forma la cantidad de microorganismos aumento, lo que sugiere mayor actividad microbiana.

En cuanto al efecto del inóculo en el tiempo de compostaje y la calidad del compost, se observó una participación activa de *Saccharomyces cerevicere* lo que se manifestó a través de un valor bajo de la relación C/N (16.01) y el tiempo de compostaje (27 días).

### Referencias bibliográficas

Beidou Xi, X. H. (2015). Effect of multi-stage inoculation on the bacterial and fungal community structure during organic municipal solid wastws composting. *Bioresource Technology*, 399-405. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.069

Camacho, A. M. (2014). Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos. *Terra Latinoamericana*, 291-230.

Chih Ping Chi, S. C. (2020). Dynamic bacterial assembly driven by *Streptomyces griseorubens* JSD-1 inoculants correspond to composting performance in swine manure and rice straw co-composting. *Bioresource Technology*.

Delgado Arroyo, M. M. (2019). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS AVÍCOLAS EMPLEANDO. *Revista Internacional de Contaminación ambientalbie.*, 964-977.

Eyherabide, M., Rozas, H. S., & Echeverría, P. B. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencias del suelo*.

Fernandez L., R. G. (2006). *Manual de Técnicas de analisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Mexico DF.

Holman, D., Xiyong Hao, T. E., & Hee Eun Yang, T. W. (2016). Effect of Co-Composting Cattle Manure with Construction and Demolition waste on the archaeal, bacterual, and funga microbiota and on antimicrobial resistance. *PLOS ONE*, 11.

Izquierdo Bautista, J. A. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región-Universidad Surcolombiana, Colombia*.

- Millán Fernando, P. J. (2018). Estudio metodológico sobre la medición de pH y conductividad eléctrica en muestras de compost. *Revista Colombiana de Química*, 21-27.
- Piñeros-Castro, Y. (2014). *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias en Colombia*. Colombia.
- Rivera, M. C. (2020). *Proceso de compostaje por Saccharomyces Cerevisiae en una Institución Educativa en Perú*. Moquegua: / Scientific e-journal of Human Sciences.
- Sundberg, C., & Navia, R. (2014). Is there still a role for composting? In *Waste Management and Research* (Vol. 32, Issue 6, pp. 459–460). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0734242X14536094>.
- Tortarolo, F., Pereda, M., Palma, M., & Marta Arrigo, N. (2008). Influencia de la inoculación de microorganismos sobre la temperatura en el proceso de compostaje. In *SUELO (ARGENTINA)* (Vol. 26, Issue 1).
- Vasquez-Castro E., M.-C. C. (2021). Una revisión sobre la diversidad microbiana y su rol en el compostaje aerobio. *Aporte Santiaguino*.
- Xu, J., Lu, Y., Shan, G., He, X., & Huang, J. (2019). *Inoculation with compost-born thermophilic complex microbial consortium induced organic matters degradation while reduced nitrogen loss during co-composting of dairy manure and sugarcane leaves*.
- Zhang, T., Wu, X., Shaheen, S. M., Rinklebe, J., Bolan, N. S., Ali, E. F., Li, G., & Tsang, D. C. W. (2021). Effects of microorganism-mediated inoculants on humification processes and phosphorus dynamics during the aerobic composting of swine manure. *Journal of Hazardous Materials*, 416. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125738>