

## ARTÍCULO CORTO DE INVESTIGACIÓN

Sociedad Colombiana  
de la Ciencia del Suelo

DOI 10.47864/SE(52)2022p100-111\_162

**ÁCIDOS ORGÁNICOS Y LA COMPOSTACIÓN: METODOLOGÍAS INNOVADORAS PARA LA OBTENCIÓN DE FÓSFORO DISPONIBLE***Daniela Urrea Rivera,<sup>1</sup> ✉ Carlos A. Peláez Jaramillo,<sup>1</sup> Nora Restrepo-Sánchez,<sup>2</sup> Yined P. Giraldo,<sup>2</sup> Gladis E. Morales Mira,<sup>1</sup> M. Liliana Acevedo Betancourth.*

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.  
✉ dpurrear@gmail.com

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín, Colombia.

**Palabras claves:** Roca Fosfórica, Fósforo Asimilable, Ácidos Orgánicos de Bajo Peso Molecular, Gallinaza, Residuos Sólidos Urbanos, Fertilizante Orgánico-Mineral.

**RESUMEN**

El costo de importación del fósforo (P) como macronutriente para cultivos se ha incrementado ostensiblemente en los últimos años, existen en Colombia yacimientos de roca fosfórica (RF) pero con contenidos de P de baja biodisponibilidad. Este trabajo evaluó el efecto de los ácidos orgánicos de bajo peso molecular (AOBPM) en la extracción del P de la RF bajo condiciones controladas de laboratorio, también se probó su incorporación junto con la RF en procesos de biotransformación para la obtención de P-asimilable (PA). Los ensayos de laboratorio se realizaron con los ácidos, fórmico, acético, propiónico, butírico, cítrico, maleico, malónico, succínico, glutárico, adipico, ftálico, málico, tartárico y oxálico en tubos de reacción, bajo condiciones controladas de temperatura a 25°C y 60°C, y tiempos de 0 y 10 días. Las concentraciones de P solubilizado (PS) que se encontraron con los ácidos cítrico, maleico, malónico, tartárico, málico y oxálico correspondieron a valores de solubilización superiores al 5.0%, siendo éstos los AOBPM que presentaron mayor potencial de extracción de P de la RF. Los procesos de biotransformación se realizaron con gallinaza, aserrín, RF y ácido oxálico a nivel de campo; y con la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), RF y ácido oxálico en reactores de 60 cm<sup>3</sup>; estos compostajes se efectuaron con el fin de obtener mezclas nutricionales orgánico-minerales ricas en P. Los FORSU generaron una biomasa con mayor concentración de PA que la gallinaza; el resultado es concluyente del mayor potencial de fertilización que tiene el sustrato FORSU con relación a las mezclas con gallinaza, dada la mayor disponibilidad de P encontrado.

**ORGANIC ACIDS AND COMPOSTING: INNOVATIVE METHODOLOGIES FOR OBTAINING AVAILABLE PHOSPHORUS**

**Key Words:** Chicken Manure, Municipal Solid Waste, Organic-Mineral Fertilizer.

**RESUMEN**

The cost of importing phosphorus (P) as a macronutrient for crops has increased significantly in recent years, although there are deposits of phosphate rock (PR) in Colombia these have P contents of low bioavailability. This work evaluated the effect of low molecular weight organic acids (LMWOAs) in the extraction of P from PR under controlled laboratory conditions. I was also tested their incorporation with PR in biotransformation processes to obtain P-assimilable (PA). Laboratory tests were performed with formic, acetic, acetic, propionic, butyric, citric, maleic, malonic, succinic, glutaric, adipic, phthalic, malic, tartaric, and oxalic acids in reaction tubes, under controlled temperature conditions at 25°C and 60°C, at 0 and 10 days. The concentrations of solubilized P found with citric, maleic, malonic, tartaric, malic, and oxalic acids corresponded to solubilization values greater than 5.0%, these being the LMWOAs with the highest potential for P extraction from PR. The biotransformation processes were set up with chicken manure, sawdust, PR, and oxalic acid at field level, as well as with municipal solid waste organic fraction (MSWOF), PR and oxalic acid in 60 cm<sup>3</sup> reactors; these processes were carried out with the purpose of obtaining P-rich organic-mineral nutritional mixtures. The MSWOF generated a biomass with a higher concentration of PA than chicken manure; the result is conclusive of the greater fertilization potential of the MSWOF substrate with respect to the mixtures with chicken manure, given the greater availability of P found.

Rec : 27/11/2022

Acep : 10/12/2022



## 1. Introducción

La RF es la principal materia prima para la producción de fertilizantes fosfatados. Los minerales de fosfato predominantes son hidroxiapatita, apatitas, fluorapatita y cloroapatita (Villanueva 2003). Colombia es el quinto productor de RF en el continente, con una producción aproximada de 60.38 toneladas por año (Agencia Nacional de Minería, 2022). Los principales yacimientos de RF se encuentran ubicados en los departamentos de Boyacá, Huila, Norte de Santander, Cundinamarca y Tolima con un contenido de fósforo total (PT) entre el 20 y 30% como  $P_2O_5$  y un fósforo asimilable (PA) entre el 1,5 y 4,9% como  $P_2O_5$  (UPME, 2016). En su mayoría el PT de la RF no se encuentra disponible para las plantas, por tanto, es necesario someterla a procesos químicos con ácidos fuertes para obtener un P que pueda ser asimilado por las plantas (Sharma et al. 2013), no obstante, existen otras formas de solubilización. Numerosos microorganismos del suelo tienen la capacidad de solubilizar P del PT del suelo a través de la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (AOBPM) (Alori et al. 2017; Bolo et al. 2021), a este grupo de microorganismos se les conoce como Microorganismos Solubilizadores de P (PSM); esta capacidad es aprovechada para solubilizar P de la RF mediante inoculación con mezclas de PSM. Algunos de los AOBPM liberados son el ácido glucónico, oxálico, cítrico, láctico, tartárico, aspártico, acético, málico, propiónico, fumárico, succínico y 2-cetoglucónico, según lo reportado por Sharma *et al* (2013); Corrales (2014); Kalayu (2019) y Bolo *et al* (2021).

El estiércol de aves (gallinaza) es uno de los principales residuos orgánicos que al ser utilizado fresco causa impactos negativos al ambiente. El compostaje genera un material estabilizado con abundante nitrógeno, materia orgánica y microorganismos (Wu et al. 2020), sin embargo, no tiene las

cantidades suficientes de nutrientes para satisfacer las demandas de los cultivos. Por otro lado, se han realizado ensayos para mejorar la disponibilidad nutricional en suelos agrícolas; Castro (2018) encontró que tratamientos con gallinaza, RF y dolomita, superaron en niveles importantes los contenidos de P disponible comparados con el testigo absoluto. En los residuos orgánicos de cocina, el P Olsen, que se considera fácilmente mineralizable, aumentó significativamente durante el compostaje (Wei et al. 2015). Se han encontrado evidencias de que la mezcla de RF con compost de residuos orgánicos domiciliarios más el uso de PSM aumenta la disponibilidad de P en los productos de compostaje, teniendo en cuenta que los ácidos orgánicos se forman en diferentes etapas del proceso (Wei et al. 2018; Zhan et al. 2021). Ahora bien, los fertilizantes minerales pueden complementar el suministro de nutrientes orgánicos de los productos de compostaje y son de alta asimilabilidad (ONU, 2002), formulándose así fertilizantes orgánico-minerales. Una de las ventajas de los fertilizantes orgánico-minerales es que, a partir del compostaje, se reciclan residuos orgánicos de origen urbano y agrícola, cuya disposición inapropiada causaría impactos ambientales (Uribe 2013; Nicolodelli *et al.* 2016).

Este estudio propone el uso de RF y AOBPM (biodegradables y compatibles con los metabolitos generados durante la descomposición de residuos), que junto con procesos de biotransformación controlada puede aumentar el P soluble de la RF. Esta metodología permitirá obtener una mayor cantidad de PA, a partir de una materia prima local, ahorrando la necesidad de importar insumos de alto costo. De otro lado, se propone una metodología limpia de solubilización como alternativa a las técnicas tradicionales, tan gravosas desde el punto de vista ambiental.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Caracterización de las rocas fosfóricas

Se hizo un sondeo de RFs de diferentes orígenes, para ello se adquirieron muestras representativas de yacimientos del Huila, Boyacá y Norte de Santander. Se cuantificó el PT y PA según la Norma Técnica Colombiana, NTC 234. Se determinó el perfil estructural de las moléculas presentes en las RFs mediante espectroscopía infrarroja, FTIR con ATR por medio de un equipo marca Thermo. La caracterización de las estructuras cristalinas de las RFs se hizo mediante difracción de rayos X con un Difractómetro (DRX) XPert PANalytical Empeyrean. Para los ensayos de

Tabla 1. AOBPM utilizados en los ensayos de solubilización de la RF y sus abreviaturas

AOBPM utilizados en los ensayos de solubilización					
ácido succínico	SUCC	ácido malónico	MALO	ácido glutárico	GLUT
ácido ftálico	FTAL	ácido cítrico	CITR	ácido málico	MALI
ácido propiónico	PROP	ácido acético	ACET	ácido butírico	BUTI
ácido tartárico	TART	ácido láctico	LACT	ácido oxálico	OXAL
ácido adípico	ADIP	ácido fórmico	FORM	ácido maleico	MALE

En los ensayos se tuvieron en cuenta las siguientes variables: relación RF:AOBPM de 100%:0%, 70%:30% y 50%:50%, temperaturas de 25°C y 60°C, intervalos de tiempo de 0 y 10 días. Se seleccionaron los AOBPM con solubilización superior al 5%

solubilización, se adquirió una RF comercial cuya ficha técnica declara una composición garantizada de PT 24,3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y PA 1,75% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

### 2.2 Ensayos de solubilización del fósforo de la roca fosfórica con ácidos orgánicos de bajo peso molecular

Con el fin de evaluar el efecto de los AOBPM en la solubilización del P contenido en la RF, se hicieron ensayos de extracción sólido – líquido por duplicado con los ácidos descritos en la tabla 1, siguiendo el procedimiento descrito en la figura 1. El PS se expresó como %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Los ácidos orgánicos usados fueron grado analítico.

para montar ensayos a 0, 5, 10, 15, 20 y 25 días. El trabajo se realizó en las instalaciones del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM) del Instituto de Química de la Universidad de Antioquia

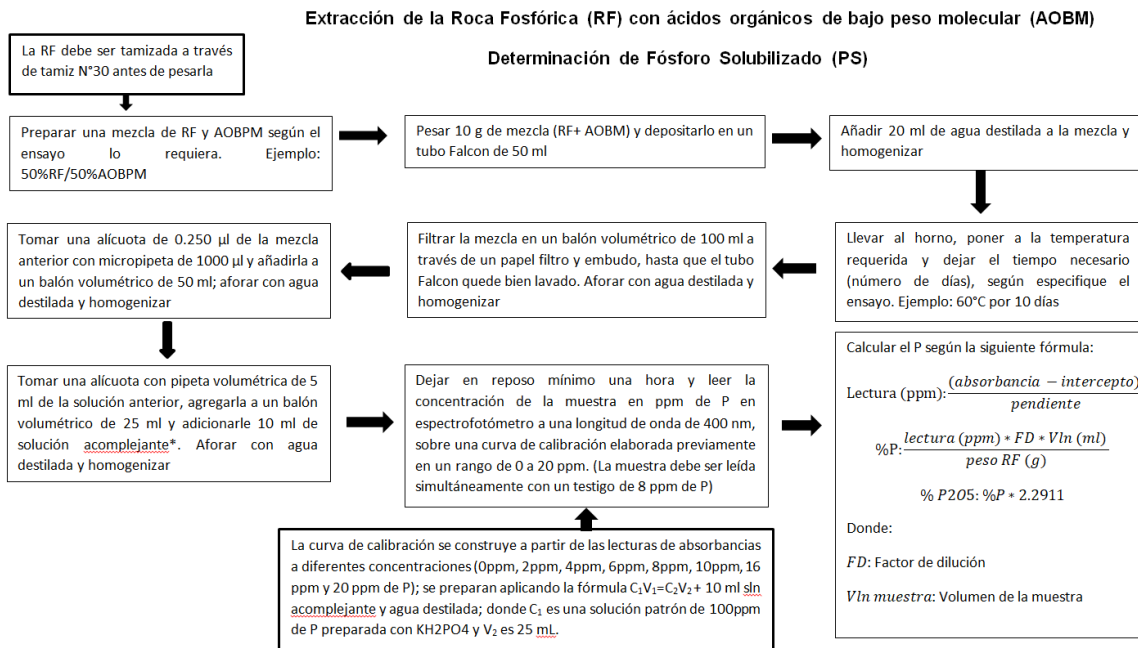


Figura 1. Diagrama de flujo del ensayo de extracción de RF con AOBPM. Acomplejante: solución de molibdo vanadato de amonio para acomplejar el fosfato. P: fósforo; %P: porcentaje de fósforo; %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: porcentaje de fósforo expresado como pentóxido de fósforo; C: concentración; V: volumen; ppm: partes por millón.

### 2.3 Ensayos de solubilización del fósforo de la roca fosfórica mediante procesos de biotransformación con gallinaza y residuos sólidos urbanos

Se realizaron procesos de biotransformación con gallinaza (GLL) proveniente del Carmen de Viboral, Antioquia (Granja Las Aves) y la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) proveniente de la Empresa de Servicios Públicos del municipio de Támesis, Antioquia. En el proceso con GLL se realizaron tres ensayos en un periodo de tiempo de 77 días: el primero con 60 kg de GLL<sup>1</sup> (100%); el segundo con 60 kg de GLL (67%) y 30 kg de RF (33%); y el tercero con 30 kg de GLL (50%), 15 kg de RF (25%) y 15 kg de OXAL (25%). El proceso con FORSU se realizó en un periodo de 44 días a partir de tres ensayos: caneca 1 (C1) compuesto por 30 kg de RSU (100%); caneca 2 (C2) con 30 kg de RSU (67%) y 15

kg de RF (33%); y caneca 3 (C3) con 30 kg de RSU (50%), 15 kg de RF (25%) y 15 kg de OXAL (25%). El manejo de los procesos se realizó mediante aireación dos veces por semana con volteo mecánico para procurar condiciones aerobias. Con el fin de realizar los análisis de laboratorio correspondientes, los cuales fueron por duplicado, se hicieron tomas periódicas de muestra con posterior secado, molienda y tamizado por malla 30. Se determinaron las formas PT y PA según la NTC 234, se midió el pH de acuerdo con la NTC 5167. Para la caracterización de los residuos frescos de GLL y RSU se evaluaron los parámetros nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) mediante las normas NTC 370, 234, 202 respectivamente, carbono orgánico, relación carbono: nitrógeno (RC/N), pH y cenizas según la NTC 5167.

<sup>1</sup> Para los procesos de compostación se usó una mezcla GLL + aserrín (70:30) para iniciar con una RC/N cercana a 17

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Caracterización de las muestras de roca fosfórica

En la tabla 2 se presenta el contenido de PT y PA de muestras de RF de diferentes

Tabla 2. PT y PA de RFs provenientes de diferentes minas.  $\bar{x}$ = promedio; DS= Desviación Estándar

Fósforo (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	RF Boyacá		RF Huila		RF Norte Santander	
	$\bar{x}$	DS	$\bar{x}$	DS	$\bar{x}$	DS
PT	30,54	0,02	20,04	0,43	18,59	0,12
PA	3,56	0,23	2,51	0,14	0,27	0,02

En la figura 2 se muestran los espectros infrarrojo-FTIR y de rayos X-DRX de las RFs. Una hidroxiapatita representativa exhibe bandas FTIR aproximadamente en 1032 y 1092 cm<sup>-1</sup> correspondientes a grupos PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, bandas en 1427 y 1455 cm<sup>-1</sup> cuando la muestra contiene impurezas de carbonatos producto del intercambio del OH<sup>-</sup> por el CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, bandas aproximadamente en 875 cm<sup>-1</sup> correspondientes a hidrogenofosfato (HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) (Sequeda, Díaz, Gutiérrez, Perdomo, & Gómez, 2012). En la figura 2A se observa que las tres muestras estudiadas presentan el mismo perfil infrarrojo, revelando la

origenes. Se observa que las RFs procedentes del Huila, Boyacá y Norte de Santander tienen un PT que oscila entre 20,0 - 30,5 %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y un PA entre 0,3 - 3,6 %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, siendo la RF proveniente de Boyacá la que registra mayor concentración de P.

similitud estructural entre las RFs, correspondiente a una hidroxiapatita típica. Los espectros DRX indican que los minerales analizados tienen una composición química similar, cuarzo, hidroxiapatita, apatita y calcita (figuras 2B, 2C y 2D), además se encontró que la RF proveniente de Boyacá contiene la mayor concentración de hidroxiapatita (63,2% en contraste con las provenientes de Huila y Norte de Santander que exhibieron contenidos de 56,9% y 37,4% respectivamente), lo que a su vez explica la mayor concentración de PT y PA encontrada en la RF de Boyacá (tabla 2).

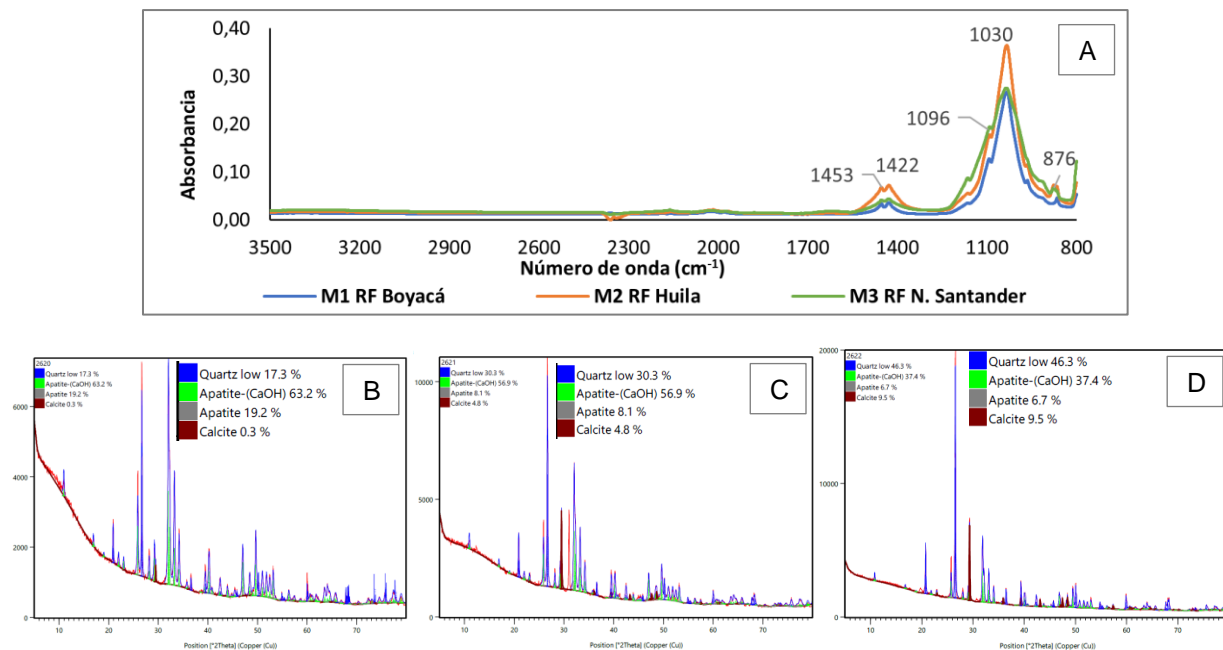


Figura 2. Espectros de RFs provenientes de diferentes minas. A. FTIR. B. DRX de RF proveniente de Boyacá, C. DRX de RF proveniente del Huila y D. DRX de RF proveniente de Norte Santander.

### 3.2. Solubilización del fósforo de la roca fosfórica con ácidos orgánicos de bajo peso molecular.

En la tabla 3 y figura 3A se presentan los porcentajes de solubilización de la RF con los AOBPM. El P que se midió en la fase acuosa después del tratamiento con los ácidos (figura 1) se denominó PS y el porcentaje de solubilización se calculó mediante la ecuación  $(PS/PT)*100$ , donde el PT de la RF usada fue 24,1% como  $P_2O_5$ .

La tabla 3 muestra los resultados de solubilización de la RF con 0% y 30% de AOBPM, respectivamente, donde se observa que la solubilización osciló entre 0,01% para el PROP (independiente de tiempo y temperatura) como valor mínimo y 31,9% para el OXAL (60°C - 10 días) como valor máximo. Estos valores son inferiores a los obtenidos usando 50% de AOBPM cuya

solubilización llegó hasta 91,7% con OXAL (figura 3A). Basados en estos resultados se seleccionó la relación RF50%:AOBPM50% para realizar el resto de los ensayos de solubilización. De acuerdo con lo que se evidencia en la figura 3A, con la proporción de 50%, los AOBPM que tuvieron una solubilización superior al 5% fueron en orden descendiente; OXAL, TART, MALE, MALI, MALO y CITR, siendo nuevamente el OXAL el de mayor efectividad a 60°C y 10 días. Estos ácidos se sometieron a la misma temperatura y composición porcentual (RF50%:AOBPM50%) en diferentes periodos de tiempo confirmándose que para el OXAL a los 10 días se alcanza la máxima solubilización, permaneciendo constante a partir de este momento (figura 3B).

Tabla 3. Resultados de solubilización  $(PS/PT*100)$  de la RF con 0% y 30% AOBPM a diferentes temperaturas y tiempos.  $\bar{x}$ = promedio; DS= Desviación Estándar.

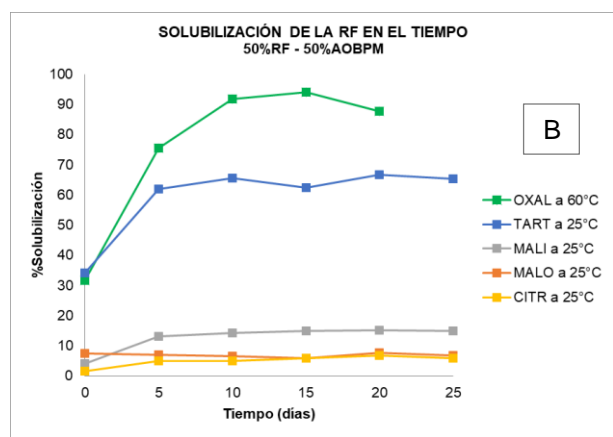
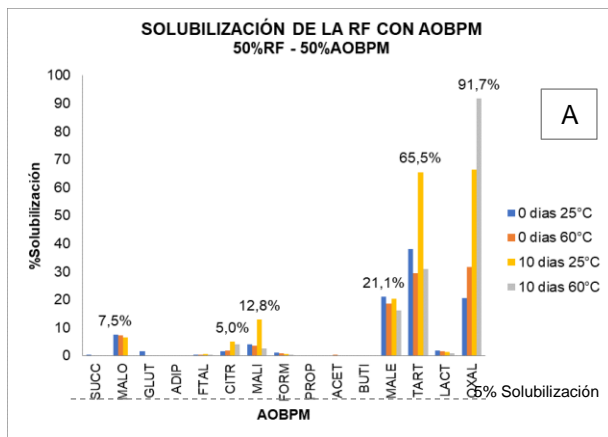
% Solubilización ( $\bar{x}$ ; DS)								
Porcentaje de AOBPM	0% (100% RF)				30% (70% RF)			
Temperatura	25°C		60°C		25°C		60°C	
Tiempo	0 días	10 días	0 días	10 días	0 días	10 días	0 días	10 días
SUCC					0,16; 0,01	0,12; 0,00	0,16; 0,01	3,35; 0,03
MALO					1,46; 0,03	1,33; 0,01	1,25; 0,02	0,21; 0,00
GLUT					1,28; 0,42	0,02; 0,00	0,97; 0,05	0,02; 0,00
ADIP					0,15; 0,00	0,03; 0,00	0,14; 0,00	0,04; 0,00
FTAL					0,24; 0,00	0,14; 0,00	0,20; 0,00	0,14; 0,00
CITR					0,35; 0,01	1,06; 0,01	0,55; 0,01	0,60; 0,00
MALI					0,62; 0,02	0,73; 0,00	0,44; 0,00	0,36; 0,01
FORM	0,58; 0,03	0,42; 0,27	0,05; 0,02	0,24; 0,07	0,56; 0,01	0,22; 0,00	0,32; 0,00	0,10; 0,00
PROP					0,02; 0,00	0,01; 0,00	0,01; 0,00	0,01; 0,00
ACET					0,05; 0,01	0,07; 0,02	0,03; 0,00	0,08; 0,01
BUTI					0,05; 0,00	0,04; 0,00	0,04; 0,00	0,02; 0,00
MALE					7,88; 0,03	5,44; 0,01	6,95; 0,05	1,74; 0,01
TART					14,2; 0,12	21,9; 0,03	12,3; 0,17	13,2; 0,08
LACT					0,64; 0,01	0,27; 0,00	0,57; 0,02	0,14; 0,01
OXAL					20,46; 0,06	28,8; 0,59	25,3; 0,30	31,9; 0,79

El TART presentó la máxima solubilización del 65,5% a los 10 días y 25°C (figura 3A);

no obstante, un barrido de solubilización en el tiempo mostró que a los 5 días ya logra

alcanzar el máximo valor (figura 3B); Cabe resaltar que el TART tiene el mejor escenario a temperatura ambiente (25°C), lo cual implica que no necesita un gasto energético para suministrar calor y lograr solubilización superior al 50%, además de alcanzarla a la mitad del tiempo del OXAL. Otro resultado importante se presenta con el MALE, ya que el máximo de solubilización (21,1%) se logró rápidamente en el día cero a temperatura ambiente (figura 3A). Autores como Wei et al. (2018) explican el comportamiento de los AOBPM frente a la RF; en este sentido afirman que los ácido oxálico, cítrico, acético, succínico, entre otros, podrían disminuir el pH, quelar los cationes unidos al fosfato (principalmente calcio) a través de sus grupos hidroxilo y carboxilo o competir con el fosfato para los sitios de adsorción, lo que lleva al aumento de solubilidad y disponibilidad del fosfato mineral.

presenta frente a la RF. Los productos de reacción entre la RF



y el OXAL son el oxalato de calcio y el ion fosfato en solución, como lo describe la reacción 1.

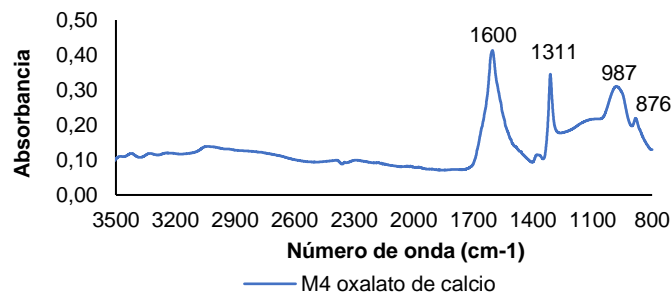
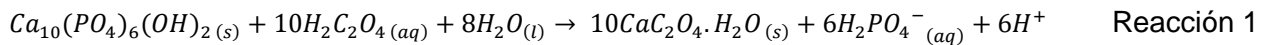


Figura 4. FTIR del oxalato de calcio obtenido en las reacciones entre la RF y el ácido oxálico.

Figura 3. A. % Solubilización de la RF con los ácidos AOBPM a temperaturas de 25°C y 60°C. B. % Solubilización de la RF con los ácidos OXAL, TART, MALI, MALO Y CITR en el tiempo.

La figura 4 corresponde al espectro FTIR tomado del producto sólido de la reacción entre la RF y el OXAL evidenciando la formación del oxalato de calcio. De esta manera también se comprueba la liberación del  $H_2PO_4^-$  por acción del ácido sobre la RF como lo representa la reacción 1. El espectro FTIR del oxalato de calcio obtenido presenta bandas características aproximadamente a 1608 y a 1313  $cm^{-1}$  que se asignan a grupos carboxilato del oxalato, lo que confirma la eficacia de la reacción.

### 3.3. Solubilización del fósforo de la roca fosfórica con ácidos orgánicos de bajo peso molecular en procesos de biotransformación controlada

#### 3.3.1 Caracterización de las muestras de gallinaza y residuos sólidos urbanos

En la tabla 4 se presentan las especificaciones fisicoquímicas de las materias primas que fueron destinadas a la biotransformación con RF y AOBPM; se advierte que la GLL es un material con buen aporte de N, P y K además de un alto contenido de carbono orgánico (CO), pero una muy baja RC/N lo que implica que el CO es insuficiente frente a la concentración de N para un proceso de compostaje viable (Mullo, 2012), razón por la cual es necesario adicionar un material carbonatado, el pH es

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la GLL y el RSU frescos

PARÁMETRO	Nitrógeno orgánico (%)	Fósforo total $P_2O_5$ (%)	Potasio total $K_2O$ (%)	Carbono orgánico (%)	RC/N	pH	Cenizas (%)
<b>GLL</b>	3,12	2,82	2,80	23,8	7,6	8,02	34,4
<b>RSU</b>	1,31	0,72	0,227	36,8	28,0	7,30	18,2

#### 3.3.2. Efecto del ácido oxálico (AOBPM) en la solubilización del fósforo de la roca fosfórica en procesos de biotransformación controlada

Dada la eficiencia del OXAL para la solubilización de P de la RF, se montaron procesos de biotransformación con GLL y FORSU adicionando proporciones distintas de RF, así como mezclas con OXAL

básico cercano a 8.0 indicando altos niveles de  $NH_3$  (Tortosa, 2013), las cenizas también altas dan cuenta de buenos contenidos de minerales que hacen que la GLL sea un material valioso como enmienda del suelo.

El análisis químico del FORSU (tabla 4) mostró un pH neutro y un N bajo lo que sugiere bajos contenidos de  $NH_3$ ; la  $RC/N > 20$  resultó ser adecuada para iniciar un proceso de descomposición controlado, el P y K son bajos, así como las cenizas lo que prueba un pobre valor mineral de los RSU en comparación a los valores indicados en la GLL.

Los parámetros determinantes para los procesos de biotransformación o compostaje son principalmente el pH, la RC/N, la humedad (Velasco et al. 2016) y la aireación. El pH, cuyo valor óptimo se sugiere en el rango de pH 6.5 - 8.0, revela que desde el punto de vista de este parámetro tanto la GLL como los RSU son aptos para el compostaje. La relación C/N se recomienda entre 20–30 por lo tanto, los RSU son adecuados para la biotransformación, pero la GLL con un valor bajo de 7.6 requiere la adición de aserrín para ajustar las condiciones iniciales (tabla 4). La humedad se plantea cerca al 60% (Velasco et al. 2016) y la aireación se recomienda de continuo.

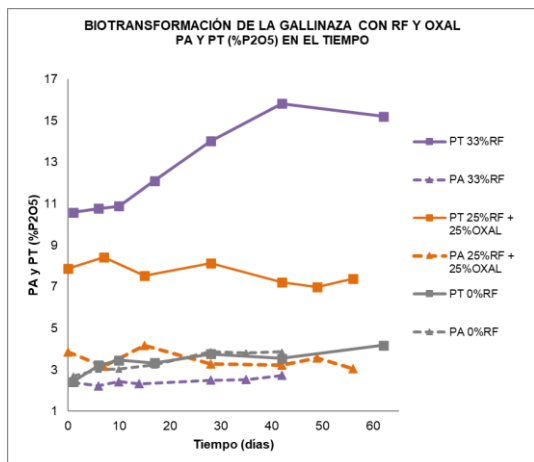
(50%:50%) en cada caso. En las Figuras 5A y 5B se presentan los resultados de PT y PA en el tiempo (expresados como  $\%P_2O_5$ ) durante los procesos de biotransformación. En el proceso con GLL (Figura 5A), se observa, como es de esperar, que el PT tuvo un aumento proporcional al contenido de RF adicionada en cada tratamiento ( $33\%RF > 25\%RF > 0\%RF$ ); no obstante, el PA se movió



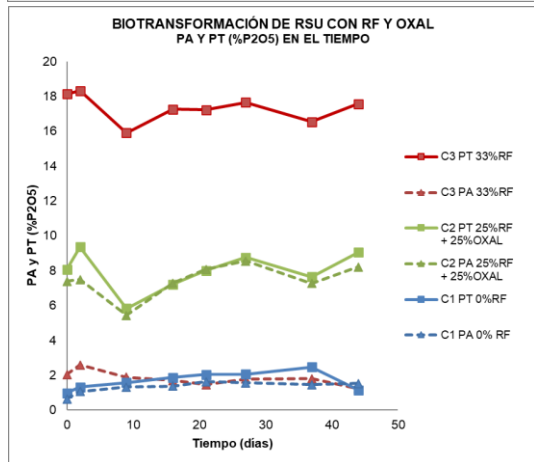
en un rango similar en los tres tratamientos (entre 2,0 y 4,0%); lo que sugiere que, en este proceso de biotransformación, la GLL no es un medio que favorezca la solubilización de P de la RF aun con la adición de OXAL. El incremento del PT en el tiempo en los tratamientos con 0%RF y

33%RF, de 2 a 4% y de 10,5 a 15,0%, respectivamente, es característico de procesos de compostaje donde se presenta mineralización; por el contrario, el tratamiento con 25%RF+25%OXAL no presenta incremento del PT lo que indica que probablemente la mineralización se frenó

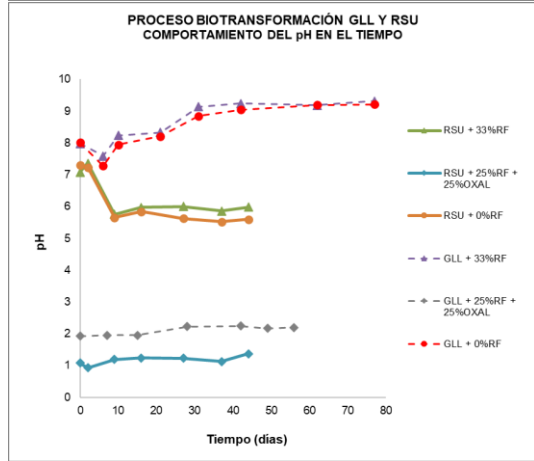
A



B



C



En el proceso con RSU (Figura 5B) también se presentó un incremento de PT proporcional al contenido de RF en los tratamientos, pero a diferencia de la GLL, los RSU sí son un medio que favorece la solubilización de P en presencia de OXAL, teniendo como resultado valores de PA que oscilan en un rango similar al PT (8-9%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en el tratamiento con 25%RF+25%OXAL (C2), lo que indica porcentajes de solubilización cercanos al 100% (PA/PT\*100). No obstante, la combinación de RSU+RF sin OXAL (33%RF, C3) no genera incremento del PA; en este tratamiento se observa que el PA se mueve en un rango inferior del 2,5%, mientras que el PT en 18% aproximadamente, mostrando que la solubilización requiere la intervención de un coadyuvante (en este caso del uso de AOBPM).

Respecto al comportamiento del pH en los procesos de biotransformación (figura 5C), los tratamientos que contenían GLL con 0%RF y 33%RF presentaron pH básicos durante todo el proceso, iniciando en 8,0 en el día 0 e incrementándose a valores superiores a 9,0 al día 31 en donde se estabiliza y permanece constante. En el trabajo realizado por Estrada (2005), donde estudiaron procesos de compostaje con gallinaza, también observaron un incremento en el pH, el cuál puede ser debido al proceso microbiano termófilo que actúa transformando el nitrógeno en amoníaco y haciendo que el pH del medio se vuelva alcalino.

Los tratamientos que contenía RSU con 0%RF y 33%RF presentaron valores cercanos a la neutralidad, lo que demuestra que la RF es un material con una buena capacidad para amortiguar el pH (Zhan et al. 2021). Ambos procesos presentaron decrecimiento del pH hasta un valor aproximado de 6,0 en el día 10, donde su tendencia se estabiliza y permanece constante. Los sistemas de compostaje de residuos de comida estudiados por diversos autores, (Zhan et al., 2021; Mendoza, 2012), tuvieron un comportamiento diferente, encontrando que el pH tiende a

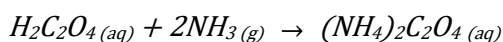
Figura 5 A. Comportamiento del PA y PT (%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en el tiempo durante los ensayos de biotransformación de GLL con (33%RF, 25%RF+25%OXAL, 0%RF); B. Comportamiento del PA y PT (%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en el tiempo de los ensayos de biotransformación de RSU con (33%RF, 25%RF+25%OXAL, 0%RF); y C. Comportamiento del pH en el tiempo de los ensayos de biotransformación de GLL y RSU.

aumentar durante el compostaje; el fenómeno de decrecimiento observado en el presente trabajo se puede explicar

por la aparición de episodios anaeróbicos durante el proceso (Bueno et al. s.f.). Los ensayos de GLL y RSU que contenía OXAL presentaron pH ácidos 2,0 y 1,0 respectivamente, con comportamiento constante desde el día 0, explicado por la presencia del ácido en el medio.

### 3.3.3 Efecto del pH en la obtención de PA de la roca fosfórica

La diferencia en el contenido de N de los dos materiales indica que la GLL como materia prima presenta un exceso de NH<sub>3</sub>, el cual es aportado por la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero, 2001), muy característico de los residuos animales y explica su pH básico, a diferencia de los RSU que por su origen vegetal presentan valores más bajos de N y explica su pH relativamente neutro (tabla 4). La reacción 2 representa el comportamiento del OXAL en presencia de altas concentraciones de amoníaco, es decir a pH básicos. La reacción produce una sal de oxalato de amonio soluble en medio acuoso.



Reacción 2

La reacción 2 explica porque en los tratamientos con gallinaza donde se aplicó

25%RF+25%OXAL no se observó incremento del PA (figura 5A) puesto que a pH básicos la reacción 1 no procede y por lo tanto no se da la liberación del ion fosfato. El amoníaco que se genera durante la biotransformación de la GLL reacciona con el OXAL, según la reacción 2, interfiriendo con la reacción 1 (entre el OXAL y el fosfato de calcio) impidiendo a su vez la formación del oxalato de calcio. Al no poder darse la reacción entre el OXAL y la RF, tampoco es posible la liberación del ion fosfato. En los RSU, por el contrario, el pH neutro que exhiben (tabla 4) indica ausencia o bajo abastecimiento de amoníaco, presentando condiciones favorables para la reacción entre el OXAL y la RF; por ende, la liberación de los iones fosfato. En este caso la reacción 1 si procedió. Se puede verificar el aumento del PA en el tratamiento con RSU+25%RF+25%OXAL (figura 5.B) en donde se obtuvo al final del proceso, una mezcla orgánico-mineral con un contenido de PA aproximado de 8%.

### Agradecimientos

A Minciencias por la financiación del proyecto. A la empresa Fosfatos de Boyacá por la muestra de RF. Al municipio de Támesis y la avícola Granja Las Aves por proveer las muestras de los residuos orgánicos.

### Referencias

AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA. (2022). "Los fosfatos son un mineral de interés estratégico para Colombia": presidente ANM. Obtenido de

<https://www.anm.gov.co/?q=los-fosfatos-son-un-mineral-de-interes-estrategico-para-colombia>.

ALORI ET, GLICK BR, BABALOLA OO (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Front. Microbiol, Sec. Plant Pathogen Interactions*.

BOLO P, KIHARA J, MUCHERU-MUNA M, MUGEND E, KINYUA M, SOMMER R (2021). Application of residue, inorganic fertilizer and lime affect phosphorus solubilizing microorganisms and microbial biomass under different tillage and cropping systems in a Ferralsol. *Geoderma* 390.

BUENO P, DÍAZ MJ, CABRER F (s. f.). Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de compostaje. Universidad de Huelva. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>

CASTRO H, GUERRERO J (2018). Evaluación de materiales de encalado mediante pruebas de incubación en un oxisol de la altillanura colombiana. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 14-26. doi:<http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183502.88>.

CORRALES LC, ARÉVALO Y, MORENO VE (2014). Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *NOVA - Publicación Científica en Ciencias Biomédicas* 12.

ESTRADA M (2005). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1). <http://hdl.handle.net/10567/333>.

KALAYU G (2019). Phosphate Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as Biofertilizers. *International Journal of Agronomy* 2019: 7.

MENDOZA MA (2012). Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura [Tesis de Pregrado, Universidad de Piura].

MULLO GUAMINGA, I. (2012). Manejo y Procesamiento de la Gallinaza. Memoria Técnica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador: <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/2114>.

NICOLODELLI G, SAVERIO G, DE OLIVEIRA I, SPOLON B, DE MELO V, MARCONDES D (2016). Double pulse laser induced break down spectroscopy: A potential tool for the analysis of contaminants and macro/micronutrients in organic mineral fertilizers. *Science of The Total Environment* 565: 1116-1123.

ONU (2002). Los fertilizantes y su uso. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma: FAO.

SÁNCHEZ-MONEDERO MA, ROIG A, PAREDES C, BERNAL MP (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Biores. Technol.*, 78 (3): 301-308.

SEQUEDA, L., DÍAZ, J., GUTIÉRREZ, S., PERDOMO, S., & GÓMEZ, O. (2012). Obtención de hidroxiapatita sintética por tres métodos diferentes y su caracterización para ser utilizada como sustituto óseo. *Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm.*, 41(1), 50-66.

SHARMA SB, SAYYED RZ, TRIVEDI MH, GOBI TA (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springerplus* 2, 587–600. doi: 10.1186/2193-1801-2-587

TORTOSA G. (2013). El pH durante el compostaje. Obtenido de *Compostando Ciencia Lab*: <http://www.compostandociencia.com/2013/11/ph-en-el-compostaje-html/>

UPME (2016). Roca fosfórica: Balance 2012 – 2016. [http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL\\_rocafosforica.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL_rocafosforica.pdf)

URIBE S (2013). Agroquímicos envenenan suelos en Colombia. *Un Periódico*: 172: 6.

VILLANUEVA L (2003). Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz (Zea Mays) [Tesis de maestría]. Universidad de Chile.

VELASCO, J., FERRERA, R., ALMARAZ, J.J., PARKINSON, R. (2016). Emisión de amoníaco durante los procesos de compostaje y vermicompostaje; aspectos prácticos y aplicados. *Agroproductividad*, 9 (8): 45-51.

WEI Y, ZHAO Y, XI B, WEI Z, LI X, CAO Z (2015). Changes in phosphorus fractions during organic wastes composting from different sources. *Bioresour. Technol* 189: 349–356.

WEI Y, ZHAO Y, SHI M, CAO Z, LU Q, YANG T, FAN Y, WEI Z (2018). Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate solubilizing bacteria inoculation. *Bioresour Technol* 247: 190–199.

WU J, ZHAO Y, WANG F, ZHAO X, DANG Q, TONG T, WEI Z (2020). Identifying the action ways of function

materials in catalyzing organic waste transformation into humus during chicken manure composting. *Bioresour. Technol* 303, 122927.

ZHAN Y, ZHANG Z, MA T, ZHANG X, WANG R, LIU Y, SUN B, XU T, DING G, WEI Y, LI J (2021). Phosphorus *oi: 10.1016/j.biortech.2021.125433*

excess changes rock phosphate solubilization level and bacterial community mediating phosphorus fractions mobilization during composting. *Bioresource Technology* 337, 125433. *d*