



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE QUÍMICA

Tesis de grado para la Licenciatura en química

Título de la tesis:

“Desarrollo de métodos analíticos para la caracterización de compost”

Autora: Agustina Valentín

Tutoras académicas: Dra. Florencia Tissot y Dra. Fiorella Iaquina

Montevideo, República Oriental del Uruguay

2025

Índice general

1	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	5
1.1	INTRODUCCIÓN GENERAL	5
1.2	COMPOSTAJE	5
1.2.1	<i>Definición y funciones del compost.....</i>	<i>5</i>
1.2.2	<i>Proceso de compostaje.....</i>	<i>6</i>
1.2.3	<i>Tipos de compostaje</i>	<i>8</i>
1.3	ELEMENTOS DE INTERÉS	12
1.4	REGULACIÓN EN URUGUAY	14
1.5	TÉCNICAS ANALÍTICAS UTILIZADAS	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	GENERAL	16
2.2	ESPECÍFICOS	16
3	PARTE EXPERIMENTAL	17
3.1	MUESTRAS, REACTIVOS E INSTRUMENTAL	17
3.2	TRATAMIENTO DE MUESTRA.....	18
3.2.1	<i>Secado y molienda.....</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Digestión ácida asistida por microondas</i>	<i>19</i>
3.2.3	<i>Extracción de nitrógeno soluble</i>	<i>19</i>
3.3	ANÁLISIS QUÍMICOS	20
3.3.1	<i>Determinación de manganeso y cromo</i>	<i>20</i>
3.3.2	<i>Determinación de cobre</i>	<i>22</i>
3.3.3	<i>Determinación de potasio</i>	<i>23</i>
3.3.4	<i>Determinación de carbono</i>	<i>23</i>
3.3.5	<i>Determinación de nitrógeno soluble y nitrógeno total.....</i>	<i>24</i>
3.3.6	<i>Análisis por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF)</i>	<i>26</i>
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1	PORCENTAJE DE HUMEDAD	28
4.2	VALIDACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DESARROLLADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE CU, MN Y CR	29
4.3	CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES	30
4.3.1	<i>Potasio</i>	<i>30</i>
4.3.2	<i>Manganeso y cromo</i>	<i>30</i>
4.3.3	<i>Cobre.....</i>	<i>31</i>
4.3.4	<i>Carbono</i>	<i>32</i>
4.3.5	<i>Nitrógeno</i>	<i>33</i>
4.3.6	<i>Relación C/N</i>	<i>34</i>
4.4	EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MN, K, CU Y CR POR EDXRF	35
5	CONCLUSIONES	38
6	REFERENCIAS	39

Índice de Figuras

FIGURA 1 EVOLUCIÓN DE TEMPERATURA, OXÍGENO Y PH DURANTE EL COMPOSTAJE. FUENTE: FAO.....	7
FIGURA 2 COMPOSTERAS ENTREGADAS POR LA INTENDENCIA DE MONTEVIDEO. FUENTE: MONTEVIDEO.GUB.UY ...	10
FIGURA 3 CAMELLONES, TRESOR. FUENTE: MUNICIPIOD.MONTEVIDEO.GUB.UY	12
FIGURA 4 MUESTRAS DE COMPOST SECAS	18
FIGURA 5 SISTEMA DE DIGESTIÓN POR MICROONDAS MARS 6. FUENTE: CEM.COM	19
FIGURA 6 MUESTRAS DIGERIDAS EN EL EQUIPO MARS 6.....	19
FIGURA 7 EXTRACCIÓN EN ÁCIDO CLORHÍDRICO	20
FIGURA 8 FILTRADO POR BOMBA DE VACÍO.....	20
FIGURA 9 ESPECTRÓMETRO AGILENT 4100 MP-AES. FUENTE: AGILENT.COM	20
FIGURA 10 GENERADOR DE NITRÓGENO AGILENT 4107. FUENTE: AGILENT.COM.....	21
FIGURA 11 FAAS ICE 3000. FUENTE: THERMOFISHER.COM.....	22
FIGURA 12 FOTÓMETRO DE LLAMA SHERWOOD 360. FUENTE: SHERWOOD-SCIENTIFIC.COM.....	23
FIGURA 13 TOC-L SHIMADZU CON MÓDULO SSM-5000A. FUENTE: SHIMADZU.COM.....	23
FIGURA 14 MUESTREADOR TOC-L. FUENTE: SHIMADZU.COM.....	24
FIGURA 15 UNIDAD TNM-L PARA NITRÓGENO TOTAL. FUENTE: SHIMADZU.COM.....	24
FIGURA 16 UNIDAD KJELDAHL KJELTEC 1002, CYTAL, FACULTAD DE QUÍMICA.....	25
FIGURA 17 MUESTRAS DIGERIDAS EN EL EQUIPO DK 6.....	25
FIGURA 18 ESPECTRÓMETRO EDXRF SHIMADZU EDX-7200. FUENTE: SHIMADZU.COM	26
FIGURA 19 PRENSA HIDRÁULICA. INSTITUTO DE FÍSICA, FACULTAD DE QUÍMICA	27

Índice de Tablas

TABLA 1 RANGOS DE CONCENTRACIONES ESTABLECIDAS EN LA LEGISLACIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA PARA CROMO Y COBRE EN COMPOST.	13
TABLA 2 EXTRACTO DEL ANEXO I DE LA RESOLUCIÓN N°141/018 DGSA REQUISITOS TÉCNICOS PARA EL REGISTRO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS.	14
TABLA 3 CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA MP AES	21
TABLA 4 CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA FAAS.....	22
TABLA 5 CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA FOTOMETRÍA DE LLAMA.....	23
TABLA 6 PROGRAMA DE TEMPERATURA PARA LAS DIGESTIONES DE LAS MUESTRAS EN LA TÉCNICA KJELDAHL	26
TABLA 7 PORCENTAJE DE HUMEDAD EN MUESTRAS DE COMPOST COMERCIAL Y COMUNITARIO	28
TABLA 8 CONCENTRACIÓN DE POTASIO TOTAL EN MUESTRAS DE COMPOST (g kg ⁻¹).....	30
TABLA 9 CONCENTRACIÓN DE MANGANESO Y CROMO TOTAL (mg kg ⁻¹).....	31
TABLA 10 CONCENTRACIÓN DE COBRE (mg kg ⁻¹)	32
TABLA 11 CONCENTRACIÓN DE CARBONO TOTAL (g kg ⁻¹)	33
TABLA 12 CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL (KJELDAHL) Y SOLUBLE (TNM-L) (g kg ⁻¹).....	34
TABLA 13 RELACIÓN C/N CALCULADA PARA LAS MUESTRAS	35

TABLA 14 CONCENTRACIONES ELEMENTALES DETERMINADAS POR EDXRF	36
TABLA 15 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO PARA LAS DETERMINACIONES DE METALES A PARTIR DE LAS DISTINTAS TÉCNICAS UTILIZADAS.....	37
TABLA 16 CIFRAS DE MÉRITO PARA LAS METODOLOGÍAS DESARROLLADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE COBRE, CROMO Y MANGANESO	29

Listado de acrónimos

- **MP-AES** - Espectroscopía de emisión atómica con plasma inducido por microondas
- **FAAS** - Espectroscopía de absorción atómica de llama
- **TOC-L** - Analizador de carbono orgánico total
- **TNM-L** - Unidad de nitrógeno total para TOC-L
- **IMM** - Intendencia Municipal de Montevideo
- **TRESOR** - Planta de Tratamiento de Residuos orgánicos
- **EDXRF** - Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva
- **DGSA** - Dirección General de Servicios Agrícolas
- **FAES** - Espectrometría de emisión atómica de llama
- **CYTAL** - Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

1 Introducción y antecedentes

1.1 Introducción general

Una sociedad que reconoce su pertenencia a los sistemas naturales tendería a respetar el ciclo de cultivo, alimentación, excreción, compostaje y retorno al cultivo. Este proceso se observaba, al menos parcialmente, en los entornos rurales, donde los desechos eran predominantemente de origen orgánico y se reincorporaban al ambiente. En un esquema ecológicamente sustentable, incluso los excrementos humanos podrían ser gestionados de manera adecuada para su devolución al suelo, contribuyendo así a mejorar su fertilidad. En contraste, la dinámica urbana interrumpe este ciclo, generando un impacto ambiental considerable. Aunque los residuos orgánicos biodegradables pueden transformarse en abono, también se generan materiales sintéticos de degradación compleja. En promedio, entre el 40 % y el 50 % de los residuos generados en el ámbito doméstico son de origen orgánico y susceptibles de ser valorizados mediante procesos de compostaje (Terra, 2024).

El crecimiento económico y el aumento del consumo de alimentos han incrementado la producción de residuos orgánicos, como consecuencia de la intensificación de los sistemas de producción agroindustrial (Azim *et al.*, 2018). En este contexto, el compostaje aparece como una estrategia ambiental y económicamente viable para la gestión de residuos, tanto a nivel industrial como comunitario, reduciendo peso y volumen, estabilizando la materia orgánica y generando un producto útil (de Souza Andrade Fontes *et al.*, 2021).

1.2 Compostaje

1.2.1 Definición y funciones del compost

El compostaje es un proceso mediante el cual diversos sustratos orgánicos se descomponen y estabilizan por acción de microorganismos, obteniéndose un producto final denominado compost. Este es un material de aspecto terroso, sin olores desagradables, libre de patógenos y semillas, que puede ser utilizado como abono de fondo para mejorar las propiedades del suelo, reemplazando fertilizantes químicos (Haug, 1993).

Los principales microorganismos involucrados son bacterias, hongos y actinomicetos, que se desarrollan en ambientes húmedos, tibios y aeróbicos (Christian, Evanylo, & Pease, 2009). En el vermicompostaje, se incorporan además lombrices, comúnmente *Eisenia foetida*, que transforman los residuos en humus de lombriz. Este sistema, más ágil y fácil de manejar, es ideal para viviendas, comercios e instituciones (IM Canelones, 2021).

Las principales funciones del compost en el suelo son: el aporte de materia orgánica que favorece la formación de humus, la mejora en el crecimiento de cultivos, la reducción de patógenos, el aumento de la resistencia a enfermedades y el aporte de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio y una variedad de elementos traza. En general se puede afirmar que los microorganismos de interés en el compostaje son organismos heterótrofos que utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía y desarrollan tejido celular a partir de nitrógeno, fósforo, carbono y otros nutrientes necesarios (Silva *et al.*, 2004).

1.2.2 Proceso de compostaje

1.2.2.1 Condiciones iniciales

El compostaje es un proceso biológico complejo cuyo desarrollo y eficiencia dependen de múltiples factores, entre los cuales la composición de la materia prima juega un papel determinante. La selección adecuada de los materiales iniciales condiciona la calidad del compost obtenido, por lo que resulta indispensable realizar un análisis preliminar de sus características físicoquímicas y microbiológicas. Entre los parámetros más relevantes se destacan el contenido de materia orgánica biodegradable, el pH, el tamaño de partícula, los niveles de nitrógeno, la humedad y el contenido de sales solubles (Cegarra, 1996).

Diversos residuos pueden ser utilizados como sustratos para compostaje. Estos incluyen residuos agropecuarios de origen vegetal y animal (como estiércoles y purines), residuos sólidos y lodos urbanos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, subproductos de la industria maderera (como aserrín y virutas), y residuos agroindustriales, tales como los generados por las industrias azucarera, cafetera, vinícola o de conservas vegetales (Cegarra, 1996).

Desde el punto de vista técnico, la estrategia más recomendable consiste en realizar mezclas binarias o ternarias que combinen materiales de diferentes orígenes con propiedades complementarias. Este enfoque permite formular sustratos con una relación equilibrada entre nutrientes, microorganismos, humedad y propiedades físicas, favoreciendo así la actividad microbiológica y optimizando el proceso de compostaje (Cegarra, 1996).

Sin embargo, ciertos residuos presentan características desfavorables para su compostaje que deben ser corregidas para lograr partir de las condiciones iniciales adecuadas. Por ejemplo, los residuos sólidos orgánicos urbanos e industriales suelen contener entre un 70 % y un 80 % de humedad, lo cual dificulta su compostaje individual. Este exceso de agua reduce la temperatura del proceso, disminuye la transferencia de oxígeno y favorece la compactación del material. Para contrarrestar estos efectos, se recomienda la adición de agentes estructurantes o materiales

esponjantes, como astillas de madera o aserrín, los cuales aumentan la porosidad del sustrato y mejoran la aireación (Eweis *et al.*, 1999).

En contraposición, los residuos con bajo contenido de humedad, como los restos agrícolas secos o los residuos de jardinería, pueden requerir acondicionamientos específicos, incluyendo el aporte de agua, nutrientes (en especial nitrógeno), y eventualmente la reducción del tamaño de partícula. En estos casos, también puede resultar útil incorporar materiales absorbentes que ayudan a mantener un nivel de humedad adecuado para favorecer la actividad microbiana (Eweis *et al.*, 1999).

Por último, cuando se utilizan materiales de difícil degradación, es recomendable complementar la mezcla con sustratos ricos en materia orgánica fácilmente biodegradable, que además aporten calor al sistema. Ejemplos comunes incluyen estiércol de animales (bovino, equino y avícola), vegetación fresca (como hojas y restos de poda), o subproductos ricos en azúcares, como melazas (Eweis *et al.*, 1999). En cuanto al pH inicial del material, lo ideal es mantenerlo cercano a la neutralidad, ya que valores demasiado ácidos o alcalinos pueden interferir con la actividad microbiológica. Por ejemplo, residuos cítricos pueden acidificar el medio e inhibir el proceso, mientras que estiércoles con pH básico pueden provocar liberación de amoníaco, con la consiguiente pérdida de nitrógeno y disminución de la calidad del compost final (Cegarra, 1996).

1.2.2.2 Fases del proceso

El proceso de compostaje, como se muestra en la Figura 1, se desarrolla a través de cuatro fases principales, cada una caracterizada por distintos niveles de actividad microbiana y transformaciones fisicoquímicas en la materia orgánica.

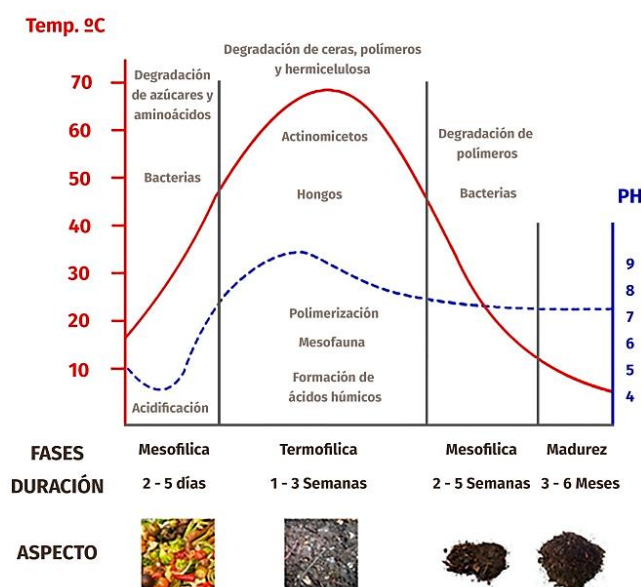


FIGURA 1 EVOLUCIÓN DE TEMPERATURA, OXÍGENO Y PH DURANTE EL COMPOSTAJE. FUENTE: FAO

La primera es la fase mesófila, que se inicia inmediatamente después de conformar la pila o sistema de compostaje. En esta etapa, cuya temperatura oscila entre los 20 y 40 °C, actúan microorganismos mesófilos que comienzan la descomposición de los compuestos más fácilmente degradables, como azúcares y proteínas simples. La actividad biológica genera calor, lo que produce un incremento gradual de la temperatura y marca la transición a la siguiente etapa (Haug, 1993).

La fase termófila se caracteriza por temperaturas que alcanzan entre 45 y 70 °C, sostenidas durante días o incluso semanas, dependiendo de factores como la aireación, la humedad y la proporción carbono/nitrógeno del material. En este estadio predominan bacterias y hongos termófilos que degradan compuestos más complejos. Esta etapa también es fundamental desde el punto de vista sanitario, ya que las altas temperaturas favorecen la eliminación de patógenos, huevos de parásitos y semillas de malezas (Haug, 1993).

Una vez agotados los sustratos fácilmente asimilables, la temperatura comienza a descender progresivamente, dando lugar a la fase de enfriamiento. Aquí se restablece la dominancia de microorganismos mesófilos, que continúan degradando la materia orgánica restante. Esta etapa implica una menor velocidad de descomposición, pero resulta crucial para la formación de compuestos húmicos más estables (Haug, 1993).

Finalmente, el proceso culmina con la fase de maduración o curado, durante la cual el compost se estabiliza y adquiere características adecuadas para su aplicación al suelo. La temperatura se mantiene cercana a la del ambiente, y la actividad microbiana disminuye significativamente. Durante esta fase se consolidan los procesos de humificación y se reduce el riesgo de fitotoxicidad, dando lugar a un producto maduro, estable y seguro desde el punto de vista agronómico y sanitario (Haug, 1993).

1.2.3 Tipos de compostaje

1.2.3.1 Compostaje domiciliario

En el compostaje domiciliario es fundamental la selección del tipo de compostera a utilizar. La misma debe tener tapa, drenajes y una bandeja para recoger el lixiviado que surge del proceso. Además, se debe tener en cuenta su volumen y el espacio disponible para la misma, debe estar en un lugar donde no reciba luz solar directamente, de fácil acceso y sin exposición al viento. Como parte de las elecciones preliminares también debe considerarse si se van a utilizar lombrices, y en caso de que se vayan a incorporar, las más adecuadas son las lombrices rojas o californianas (*Eisenda foetida*) en un núcleo mínimo de 100-150 lombrices. Antes de introducirlas en la compostera se debe acumular algo de material orgánico fácilmente digerible (por ejemplo,

cáscaras de fruta y verdura) por unos días y colocarlo en la compostera junto con un poco de tierra o humus (CEMPRE, s.f).

El proceso continúa alimentando la compostera periódicamente con residuos orgánicos verdes y marrones. Dentro de los residuos verdes se pueden encontrar restos de frutas, verduras, yerba, café y té, pasto recién cortado y restos de plantas verdes, los cuales aportan mayoritariamente nitrógeno. Dentro de los residuos marrones se encuentran ramas, pasto seco, hojas secas, aserrín, papel y cartón sin tinta, hueveras y tubos de cartón de cocina o papel higiénico, los cuales aportan mayoritariamente carbono y son imprescindibles para controlar la humedad. Residuos, como carne y restos animales, aceites y grasas, madera tratada, cartón o papel con tinta, grandes cantidades de cítricos y cebolla no deben ser introducidos en la compostera, ya que disminuyen el pH del compost. La mezcla de ambos tipos de residuos (verdes y marrones) permite obtener un compost de buena calidad. Se recomienda mezclar una parte de residuos verdes con dos partes de residuos secos (INTI, s.f).

Para garantizar la calidad del producto final deben realizarse diferentes actividades durante el proceso de compostaje. Se controla la humedad y la temperatura de la compostera, se remueve el material cada cierto tiempo para garantizar la aireación adecuada y en el caso de vermicompostaje es fundamental mantener a oscuras a las lombrices. Para comprobar que la humedad es adecuada se puede utilizar el test del puño, el cual consiste en tomar una porción del compost con la mano y cerrarla de forma de ver cuánto líquido escurre. Si escurren muchas gotas hay que agregar restos marrones, si son muy pocas o no cae ninguna se debe humedecer con un poco de agua y agregar restos verdes. Si el material desprende entre ocho y diez gotas se encuentra con una humedad óptima. Remover el material es necesario también para evitar el apelmazamiento y mezclar los materiales frescos con los descompuestos y así acelerar el proceso. En caso de vermicompostaje, se debe hacer aproximadamente una vez por semana, ya que de lo contrario las lombrices se sienten molestas y disminuyen su trabajo. Las mismas también son fotofóbicas, por lo que la vermicompostera debe ser de material opaco y la tapa debe abrirse lo menos posible. Una vez que el recipiente esté lleno se debe cerrar y esperar a que el compost se termine de formar. Esto tarda de tres a seis meses y se obtiene un material oscuro, uniforme, suelto y esponjoso con olor agradable a tierra húmeda (CEMPRE, s.f).

En Uruguay las composteras domiciliarias se pueden conseguir comercialmente en diversas tiendas, pero además existen diversos proyectos a lo largo del país mediante los cuales las intendencias municipales ofrecen talleres de capacitación a los ciudadanos que quieran incursionar en esta forma de gestión de residuos. Se otorgan gratuitamente una compostera

(Figura 2) y un núcleo de lombrices por persona de forma gratuita (Intendencia Municipal de Canelones, s.f).



**FIGURA 2 COMPOSTERAS ENTREGADAS POR LA INTENDENCIA DE MONTEVIDEO.
FUENTE: MONTEVIDEO.GUB.UY**

1.2.3.2 Compostaje industrial

El compostaje industrial es un proceso controlado y a gran escala destinado al tratamiento de residuos orgánicos, especialmente aquellos que no pueden ser gestionados eficientemente en sistemas domiciliarios o comunitarios, como restos de carne, lácteos, grandes volúmenes de poda o residuos de la industria alimentaria. A diferencia del compostaje doméstico, que suele ser más lento y limitado en materiales, el compostaje industrial emplea tecnologías específicas que permiten acelerar la descomposición y garantizar condiciones higiénicas y ambientales adecuadas (EPA, 2021).

Los sistemas de compostaje han evolucionado considerablemente desde sus formas más tradicionales, que consistían en pilas o hileras estáticas al aire libre con volteos periódicos para mantener la aireación. Con el aumento sostenido en la generación de residuos, especialmente los residuos sólidos urbanos, el compostaje adquirió un rol central en la gestión de la fracción orgánica, lo que impulsó el desarrollo de tecnologías más eficientes y controladas. En este contexto, el compostaje asume dos roles principales: la producción de un acondicionador del suelo útil para la agricultura y la generación de un material estabilizado apto para su disposición en vertederos (lo que se conoce como estabilización aeróbica).

Los sistemas de compostaje a gran escala se clasifican en dos grandes grupos. Los sistemas abiertos, que se desarrollan al aire libre o en estructuras parcialmente cerradas y son más vulnerables a las condiciones meteorológicas, pero de menor costo. Por otra parte, en los sistemas cerrados el compostaje se lleva a cabo en ambientes confinados, lo que permite un mejor control

de gases y olores y una mayor eficiencia en la primera fase del compostaje. Entre los sistemas abiertos, el compostaje en pilas o hileras es la técnica tradicional más extendida. Consiste en formar montones de material orgánico (de 1 a 3 m de altura y 3 a 8 m de ancho) que pueden ser volteados o aireados cuando sea necesario. La forma recomendada de la pila es trapezoidal o triangular truncada, para optimizar el espacio y la ventilación. Dentro de este sistema hay tres variantes: pilas estáticas sin volteo ni aireación forzada, pilas estáticas aireadas que incorporan ventilación mediante flujo de aire generado por ventiladores, y pilas con volteo mecánico que utilizan maquinaria como palas frontales o volteadoras especiales para mezclar y oxigenar el material. Este método es más común en instalaciones de mayor escala.

Por otra parte, los biorreactores son estructuras cerradas que pueden tener forma de tambor o compartimento rígido y fueron diseñadas para contener el material durante la primera etapa del compostaje, que requiere más control. Según el modo de funcionamiento pueden clasificarse en operación continua donde el material se va incorporando progresivamente, o en operación discontinua cuando el material se carga por lotes una vez que el proceso anterior finaliza. Además, pueden ser dinámicos o estáticos, dependiendo de si hay o no movimiento interno del material. Esta diversidad de enfoques permite adaptar el sistema de compostaje a las características del residuo, la escala de producción y los objetivos del proceso, ya sea como estrategia de valorización para la agricultura o como estabilización previa a la disposición final en vertederos, además de que se pueden procesar grandes volúmenes de residuos en tiempos reducidos. (Docampo, 2013; EPA, 2021; Haug, 1993).

Una vez finalizada la fase de descomposición activa, comienza el período de curado, durante el cual la temperatura de las pilas disminuye progresivamente a medida que los microorganismos agotan sus fuentes de alimento. Esta etapa marca la transición hacia un compost más estable con una menor actividad biológica. La temperatura de la pila desciende mientras el material adquiere un color más oscuro, una textura más fina y un olor similar al de la tierra. Cuando el compost va a ser comercializado es sometido a un cribado, mediante el cual se separan las partículas de mayor tamaño, que pueden ser reutilizadas como material estructurante en nuevas pilas, optimizando así el uso de recursos dentro del proceso (NC Composting Council, 2025).

En Montevideo desde 1999 está en funcionamiento la planta de tratamiento de residuos orgánicos TRESOR perteneciente a la División Limpieza del Departamento de Desarrollo Ambiental de la IMM. Allí se procesan residuos orgánicos provenientes principalmente de la gestión municipal y agroindustrias como la industria láctea, de bodegas y sidrerías, cervecerías y malterías, mercados de hortifruticultura, chacinerías y frigoríficos y podas del ornato público de Montevideo. Una vez que ingresan en TRESOR los residuos son mezclados y dispuestos en pilas a cielo abierto que se

denominan “camellones”, como se muestra en la Figura 3. Estos son aireados mecánicamente y controlados de forma periódica (Municipiod, 2024).



FIGURA 3 CAMELLONES, TRESOR. FUENTE: MUNICIPIOD.MONTEVIDEO.GUB.UY

Hoy en día la planta procesa 15000 ton/año de residuos. Al cabo de un período de entre 9 y 12 meses se obtiene un compost maduro que es acopiado a la intemperie. La producción anual de compost es cercana a los 4000 m³/año. Una parte de la producción de compost permanece en el predio donde funciona TRESOR y el vivero del Servicios de Áreas Verdes de la IMM y se emplea en las tareas de parqueizado, plantación y vivero. Otra parte de la producción sale del predio como donación a centros educativos y organizaciones sociales. Además, se comercializa a granel a granjas hortifrutícolas y a viveros agropecuarios (Ing. Agr. Fernando Ronca Kozuch, s.f).

1.3 Elementos de interés

Uno de los parámetros más importantes para la evaluación del proceso de compostaje y la calidad del compost es la relación C/N (Azim *et al.*, 2018). El carbono (C) es una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno (N) es necesario para la síntesis proteica, por lo que una relación adecuada entre estos dos nutrientes favorecerá el crecimiento y la reproducción adecuados para el proceso. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N, por lo tanto, se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35. La relación C/N ideal para un compost totalmente maduro es cercana a 10, similar a la del humus. En la práctica se suele considerar que un compost es suficientemente maduro cuando la relación $C/N < 20$ (Castells, 2005). El N puede estar presente en el compost de forma insoluble, formando parte de proteínas y compuestos orgánicos, o soluble, en forma de NO_3^- o NH_4^+ . La forma insoluble del N es mayoritaria (97-99%), mientras que la forma soluble no suele superar el 2-3% y son las únicas formas asimilables por las plantas (Olmedo, 1993).

En lo que se refiere al contenido de micronutrientes, si bien son necesarios para el desarrollo de los cultivos, su presencia en exceso puede modificar la calidad final del compost. En el caso

particular del cromo (Cr), los compuestos de Cr(VI) se utilizan para cromado y como conservador de maderas, por lo que pueden estar presentes en los residuos y permanecer en el compost. Asimismo, el Cr(VI) es carcinogénico, mientras que el Cr(III) es considerado un nutriente esencial, aunque altos niveles de exposición pueden causar efectos adversos (Selinus, 2005). El cobre (Cu) es un micronutriente que es requerido por las plantas en pequeñas cantidades para la síntesis de clorofila, reacciones enzimáticas y en funciones de reproducción, entre otras. La deficiencia de Cu puede manifestarse mediante la aparición de hojas curvadas y amarillas y poco crecimiento de la planta. La legislación de la Unión Europea establece rangos con concentraciones mínimas y máximas requeridas de algunos micronutrientes. Para Cu y Cr los rangos se presentan en la siguiente Tabla (Langenkamp & Marmo, 2002).

TABLA 1 RANGOS DE CONCENTRACIONES ESTABLECIDAS EN LA LEGISLACIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA PARA CROMO Y COBRE EN COMPOST.

Elemento	Mínimo (mg kg ⁻¹)	Media (mg kg ⁻¹)	Máximo (mg kg ⁻¹)
Cr	13,9	27,0	93,5
Cu	34,0	52,2	2215

El potasio (K) es un macronutriente necesario para el crecimiento de las plantas. Participa en la síntesis de carbohidratos y translocación de azúcares y en los mecanismos de resistencia a varias enfermedades. La forma soluble es la que se encuentra disponible y es capaz de ser absorbida por las plantas (Tan, 2005). El valor requerido para K expresado como % K₂O es de 1,2% en base seca. Por otra parte, el manganeso (Mn) es un micronutriente esencial para el funcionamiento de diversas enzimas y también juega un rol esencial en el metabolismo del N. Un exceso de Mn puede tener efectos tóxicos en las plantas, como necrosis en diferentes tejidos, por lo que es necesario monitorear su concentración. Sin embargo, no hay valores de referencia para este elemento (Langenkamp & Marmo, 2002).

El presente trabajo surge ante la necesidad de evaluar la calidad del compost disponible en el mercado y en espacios comunitarios, desde el punto de vista de macro y micronutrientes, en el contexto de una creciente valorización de residuos orgánicos. El compost de buena calidad debe cumplir requisitos nutricionales, sanitarios y ambientales para ser seguro y efectivo en aplicaciones agrícolas o urbanas. La caracterización fisicoquímica de muestras de compost permite evaluar su grado de madurez, valor agronómico y cumplimiento de normativas. Además, posibilita detectar posibles riesgos por presencia de metales pesados potencialmente tóxicos. Se propone así el desarrollo de metodologías analíticas para la determinación de Cu, Cr, Mn, K, C y N.

1.4 Regulación en Uruguay

En nuestro país, existen una serie de requisitos técnicos sanitarios y fisicoquímicos que se encuentran descritos en el Anexo I de la Resolución N°141/018 DGSA Requisitos Técnicos para el Registro de Enmiendas Orgánicas. A modo de ejemplo, se destacan las exigencias respecto al pH, humedad, relación C/N y a la presencia de metales pesados. Además de estos parámetros, es necesario controlar el grado de impurezas como el contenido de vidrios, plásticos y metales, siendo en general permitido alrededor del 3% del porcentaje en peso. El compost que no esté destinado a la venta no está contemplado en la legislación, pero se pueden usar los requisitos establecidos como referencia para su evaluación (MGAP, 2018). Algunos de los requerimientos se describen en la Tabla 2.

TABLA 2 EXTRACTO DEL ANEXO I DE LA RESOLUCIÓN N°141/018 DGSA REQUISITOS TÉCNICOS PARA EL REGISTRO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS.

N total expresado en base seca	<0,5%
Humedad	Entre 20% y 40%
Relación C/N siendo N total: N orgánico y N amoniacal	<30
Cu expresado en base seca	<100 (mg kg ⁻¹)
Cr total expresado en base seca	<100 (mg kg ⁻¹)

La resolución actual no establece valores máximos permitidos para K y Mn. A modo de comparación, para el K, se utilizó el Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes estableciendo los valores adecuados para la concentración de este analito. Por otra parte, para el Mn, se utilizó como referencia la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos que especifica la concentración segura de elementos potencialmente tóxicos para distintos grupos de organismos terrestres para el caso del Mn. De acuerdo con el Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, los abonos orgánicos sólidos deben cumplir con ciertos requisitos mínimos para ser considerados como tales dentro del mercado de fertilizantes de la Unión Europea. En particular, deben contener al menos uno de los nutrientes primarios declarados (N, P y K, siendo las concentraciones de P y K expresadas como sus óxidos P₂O₅ o K₂O respectivamente) en concentraciones específicas. Si el producto contiene sólo uno de estos nutrientes, la concentración mínima requerida es de 2,5 % para N total, 2 % para P₂O₅ total o 2 % para K₂O total. En caso de declarar más de un nutriente, cada uno deberá estar presente en al menos 1 %, y la suma total de nutrientes deberá alcanzar como mínimo el 4 % en masa (Unión Europea, 2019). En el caso del manganeso (Mn), los valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) son de 220 mg kg⁻¹ peso seco para plantas.

Estos criterios permiten establecer una base comparativa para evaluar la calidad de las muestras de compost analizadas en este trabajo, particularmente en relación con su potencial uso como fertilizante orgánico sólido, y en el caso del Mn posibles riesgos ecológicos asociados a su presencia en los mismos.

1.5 Técnicas analíticas utilizadas

Las técnicas analíticas empleadas a lo largo de este trabajo fueron Espectrometría de emisión atómica de plasma inducido por microondas (MP-AES) para la determinación de Mn y Cr, Espectrometría de absorción atómica de llama (FAAS) para Cu y Espectrometría de emisión atómica de llama (FAES) para K. Respecto a la determinación de C y N, las técnicas clásicas de determinación de estos elementos involucran metodologías laboriosas, con reactivos potencialmente peligrosos como K_2CrO_7 o ácidos concentrados y con gran consumo de energía y tiempo (Skoog, 2005). Alternativamente, la determinación de este parámetro puede realizarse mediante la determinación de las concentraciones de C y N utilizando un analizador de carbono orgánico total que también permite la determinación de la concentración de nitrógeno total. El funcionamiento del analizador de C se basa en la oxidación catalítica de la muestra para formar dióxido de carbono que luego es detectado en un detector IR no dispersivo (NDIR). El análisis de N soluble se lleva a cabo mediante la combustión de la muestra para formar NO, que luego de ser secado y enfriado pasa por un analizador de quimioluminiscencia donde reacciona con ozono para formar una mezcla de NO_2 y NO_2^* (Tan, 2005). Para la determinación de N total, se empleó el método de Kjeldahl. Asimismo, el K y los micronutrientes analizados fueron determinados posteriormente por Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF).

2 Objetivos

2.1 General

Desarrollar metodologías analíticas que permitan caracterizar el compost, a través del análisis de macro y micronutrientes como carbono, nitrógeno, potasio, cobre, cromo y manganeso.

2.2 Específicos

- Desarrollar una metodología de preparación de muestras que permita la extracción cuantitativa simultánea de cobre, cromo y manganeso y potasio en compost.
- Optimizar los parámetros analíticos para la determinación simultánea de cobre, cromo y manganeso mediante MP-AES.
- Optimizar los parámetros analíticos para la determinación de potasio mediante espectrometría de emisión atómica de llama.
- Validar las metodologías desarrolladas para la determinación de los elementos manganeso, cobre y cromo en el compost.
- Determinar la concentración de cobre, cromo y manganeso en las muestras de compost.
- Optimizar las operaciones preliminares para la determinación de carbono y nitrógeno utilizando un analizador de carbono y nitrógeno.
- Determinar la concentración de carbono y nitrógeno en las muestras de compost.
- Determinar la cantidad de nitrógeno soluble.
- Comparar los resultados obtenidos con la Resolución N.º 141/018 del MGAP y bibliografía internacional, analizando las diferencias entre las muestras comerciales y las obtenidas en composteras comunitarias.
- Evaluar los resultados obtenidos mediante técnicas que requieren una extracción de los analitos, con los resultados obtenidos mediante EDXRF, técnica que no requiere tratamiento de muestra.

3 Parte experimental

3.1 Muestras, reactivos e instrumental

Para este estudio se analizaron diez muestras de compost, de las cuales nueve fueron adquiridas en comercios locales y una corresponde a una compostera comunitaria ubicada en la Facultad de Química, basada principalmente en yerba mate como sustrato. Las muestras comerciales se presentaban bajo las denominaciones de compost, humus o turba, con formulaciones variables según el fabricante.

Los análisis se llevaron a cabo utilizando reactivos de grado analítico. Entre ellos se incluyen ácido nítrico concentrado (HNO_3 , Sigma-Aldrich, EE. UU.), cloruro de potasio (KCl , Merck, Alemania), ácido clorhídrico concentrado (HCl , Supelco, Alemania), cloruro de cesio (CsCl (s) m/v, Merck, Alemania), catalizador (CuSO_4 (Fulka, Suiza) y K_2SO_4 0,4/3,5 g (Merck, Alemania), ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 , Carlo Erba, Francia), silicona antiespumante (Droguería Industrial Uruguay, Uruguay), ácido bórico (H_3BO_3 conc., Carlo Erba, Francia), indicador mixto azul de metileno (Merck, Alemania)-rojo de metilo (Pablo Ferrando S.A, Uruguay), hidróxido de sodio sólido (NaOH , Dorwil, Argentina). Se utilizó agua ultrapura ASTM tipo I, obtenida mediante un sistema de purificación Millipore DirectQ3 UV (Millipore, Bedford, MA, EE. UU.).

Para las curvas de calibración de metales se prepararon estándares de calibración a partir de una solución stock multielemento de 1000 mg L^{-1} (ICP multi-element standard solution IV, Merck, Alemania) mediante diluciones seriadas en HNO_3 2% v/v preparado a partir de HNO_3 concentrado.

La curva de calibración para la determinación de C se preparó a partir de hidrogenoftalato de potasio ($\text{C}_8\text{H}_5\text{O}_4\text{K}$, May & Baker, Inglaterra) y para la determinación de N se preparó a partir de nitrito de sodio (NaNO_2 , May & Baker, Inglaterra).

Para los estudios de precisión y veracidad se utilizaron los materiales de referencia certificados Marandu (*Brachiaria brizantha* cv Marandu) y Suelo arenoso, ambos provistos por RM-Agro (Brasil). Como material de referencia de C se utilizó CRM TOC 1000 mg L^{-1} (Sigma-Aldrich, EE. UU.).

Las muestras se secaron en una estufa DAIHAN Scientific ON-32 (Gangwon-d, Corea del Sur) y fueron molidas en un molino de bolas Analysette 3 Spartan (Fritsch, EE. UU.). La digestión de las muestras se llevó a cabo en un sistema MARS 6 (CEM, EE. UU.). La determinación de Mn y Cr se realizó en espectrómetro Agilent 4100 MP-AES con generador de nitrógeno Agilent 4107. Para la determinación de Cu se utilizó un espectrómetro iCE 3500 (Thermo Scientific, EE. UU.)

equipado con una lámpara de cobre de cátodo hueco PHOTRON ($\lambda=324,8$ nm), y para K las determinaciones se realizaron en un fotómetro de llama Sherwood modelo 360 (Reino Unido).

Por otra parte, los análisis de C y N fueron realizados en un sistema TOC-L (Shimadzu, Japón), acoplado al módulo de sólidos SSM-5000A y a la unidad TNM-L para nitrógeno soluble. Además, el nitrógeno total fue analizado mediante el Método Kjeldahl con el uso de la unidad de destilación Kjeltec System 1002 (Tecator, Dinamarca) y las digestiones para este se realizaron mediante un digestor modelo DK 6 (Velp Scientifica, Italia). Para la extracción del nitrógeno soluble en agua y medio básico suave se utilizó un baño de agua con agitador SBS40 (Stuart, Reino Unido) y para el filtrado de la solución sobrenadante se utilizó una bomba de vacío Rocker 300 (Rocker, Taiwán). Para las determinaciones de los analitos de interés mediante Fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (EDXRF) se utilizó un espectrómetro EDX-7200 (Shimadzu, Japón). Los pellets de las muestras analizados en este último se realizaron con una prensa hidráulica en el Instituto de Física de la Facultad de Química.

3.2 Tratamiento de muestra

3.2.1 *Secado y molienda*

Se pesaron aproximadamente 5 g de cada muestra y se colocaron en una estufa a 105 °C durante 24 horas o hasta alcanzar masa constante (Figura 4).

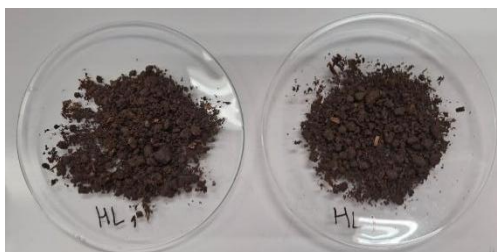


FIGURA 4 MUESTRAS DE COMPOST SECAS

Una vez secas, las muestras fueron molidas utilizando un molino de bolas durante 5 a 10 minutos, hasta obtener partículas de tamaño muy fino. Posteriormente, se tamizaron utilizando un poro de 430 μm y se almacenaron en frascos de polipropileno en desecador a temperatura ambiente hasta su análisis.

3.2.2 Digestión ácida asistida por microondas

Para la determinación de metales por espectrometría atómica se realizó una digestión ácida asistida por microondas utilizando un sistema MARS 6 como se muestra en la Figura 5.



FIGURA 5 SISTEMA DE DIGESTIÓN POR MICROONDAS MARS 6. FUENTE: CEM.COM

Se pesaron exactamente entre 0,2 y 0,3 g de muestra seca y molida en los tubos de digestión, a los que se añadieron 10,0 mL de HNO_3 concentrado. El método utilizado para la digestión de las muestras fue US EPA 3051. El programa consiste en el calentamiento hasta 175°C durante 5:30 minutos, se mantiene en esa temperatura durante 4:30 minutos y luego se enfría. El equipo permite procesar hasta 12 muestras por ciclo, por lo que se realizaron tres tandas que incluyeron réplicas, blancos de digestión y materiales de referencia. Los digestos obtenidos (Figura 6) fueron utilizados para las determinaciones de Mn, Cr, Cu y K. total.

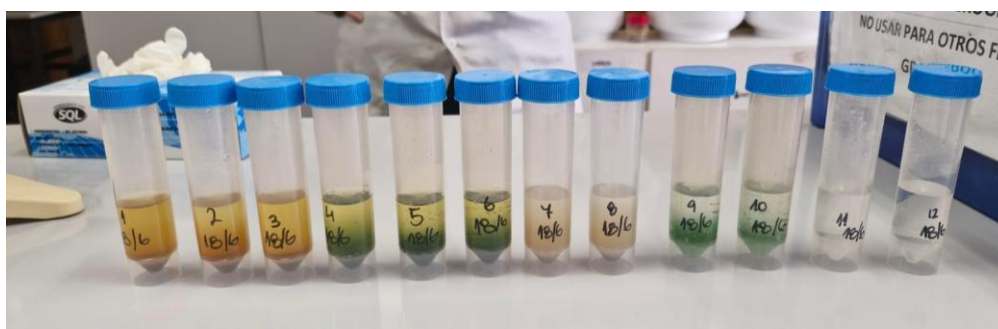


FIGURA 6 MUESTRAS DIGERIDAS EN EL EQUIPO MARS 6

3.2.3 Extracción de nitrógeno soluble

La extracción de nitrógeno soluble se llevó a cabo utilizando una solución de KCl 2 M preparada a partir de KCl sólido disuelto en agua purificada. Se pesaron exactamente aproximadamente 1,0 g de muestra seca y molida y se agregaron 25,0 mL con la solución de KCl (Wheatley R.E *et*

al., 1989). Las mezclas se colocaron en un baño termostatzado con agitación a 55 °C durante un tiempo entre 40 y 60 minutos (Figura 7). Luego del tratamiento, las soluciones se filtraron utilizando una bomba de vacío (Figura 8) para obtener así la solución sobrenadante.



FIGURA 7 EXTRACCIÓN EN ÁCIDO CLORHÍDRICO



FIGURA 8 FILTRADO POR BOMBA DE VACÍO

3.3 Análisis químicos

3.3.1 Determinación de manganeso y cromo

La determinación de manganeso (Mn) y cromo (Cr) se realizó mediante espectrometría de emisión atómica con plasma inducido por microondas. En las Figuras 9 y 10 se muestran los equipos utilizados.



FIGURA 9 ESPECTRÓMETRO AGILENT 4100 MP-AES. FUENTE: AGILENT.COM



FIGURA 10 GENERADOR DE NITRÓGENO AGILENT 4107. FUENTE: AGILENT.COM

Se preparó una curva de calibración conteniendo ambos elementos en agua ultrapura con cinco puntos equidistantes de concentración entre 0,0 y 1,5 mg L⁻¹. Las muestras previamente digeridas fueron diluidas (1:10 o 1:25) en función del rango lineal del analito en el equipo. También fue necesaria la dilución para disminuir su acidez y la concentración de sólidos disueltos, de forma de cumplir con las condiciones operativas del equipo (pH > 2, TDS < 3%). Las condiciones experimentales se describen en la Tabla 3 y el procesamiento de los datos se realizó mediante el software MP Expert.

TABLA 3 CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA MP AES

Elemento	Tiempo de lectura (s)	Posición de observación (mm)	Flujo del nebulizador (L min ⁻¹)	Velocidad de la bomba (rpm)	λ (nm)
Cr	3	10	0,95	30*	425,433
Mn	3	20	0,95	30*	403,076

30 rpm corresponden a 0,90 mL min⁻¹.

3.3.2 Determinación de cobre

Inicialmente se intentó medir el cobre (Cu) junto con Mn y Cr por MP-AES, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios debido a la baja concentración del analito en las muestras. Por este motivo, se optó por realizar su determinación mediante espectrometría de absorción atómica de llama (FAAS), técnica que permite trabajar directamente con las digestiones ácidas sin necesidad de dilución. Para este análisis se utilizó un espectrómetro como se muestra en la Figura 11.



FIGURA 11 FAAS ICE 3000. FUENTE: THERMOFISHER.COM

La curva de calibración fue construida a partir de cinco puntos equidistantes de concentraciones entre 0,0 y 1,5 mg L⁻¹ en agua ultrapura. Las condiciones experimentales se describen en la Tabla 3 y los resultados fueron procesados mediante el software SOLAAR.

TABLA 4 CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA FAAS

Elemento	Longitud de onda (nm)	Tiempo de medida (s)	Corrector de fondo	Rendija (nm)	Tipo de llama	Flujo de combustible (L min ⁻¹)
Cu	324,8	4,0	Deuterio	0,5	Aire-C ₂ H ₂	1,1

3.3.3 Determinación de potasio

La cuantificación del potasio (K) se realizó mediante fotometría de emisión atómica de llama mediante un fotómetro como el que se muestra en la Figura 12. Las muestras digeridas fueron diluidas en agua ultrapura en proporción 1:100 y se les adicionó CsCl al 10 % m/v como buffer de ionización.



FIGURA 12 FOTÓMETRO DE LLAMA SHERWOOD 360. FUENTE: SHERWOOD-SCIENTIFIC.COM

Se preparó una curva de calibración de seis puntos entre 0,0 y 10 g L⁻¹ a partir de una solución estándar de potasio en HNO₃ 0,32 mol L⁻¹. Las condiciones experimentales se describen en la Tabla 4.

TABLA 5 CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA FOTOMETRÍA DE LLAMA

Longitud de onda (nm)	Llama
766,5	C ₃ H ₈ /C ₄ H ₁₀ -Aire

3.3.4 Determinación de carbono

Las medidas de carbono en las muestras se realizaron mediante un equipo analizador de carbono total TOC-L, Shimadzu, acoplado al módulo para sólidos SSM-5000 como el que se muestra en la Figura 13.



FIGURA 13 TOC-L SHIMADZU CON MÓDULO SSM-5000A. FUENTE: SHIMADZU.COM

En este equipo, las muestras se introducen secas y molidas a las navecillas de cerámica en el compartimiento correspondiente a medida de Carbono Total (inorgánico+orgánico) mostrado en la Figura 14.



FIGURA 14 MUESTREADOR TOC-L. FUENTE: SHIMADZU.COM

Las medidas se hicieron mayoritariamente a partir de 0,2 g de muestra (salvo casos donde la concentración de C era más elevada por lo que la masa de muestra fue menor) y la curva de calibración constó de tres puntos de concentración de carbono de 5000, 10000 y 20000 mg L⁻¹ más un blanco. Las soluciones patrón no se pueden medir directamente en el módulo para sólidos por lo que se introduce en las navecillas una porción de lana de vidrio y sobre la misma se vierte un volumen exacto de patrón. Con el material de referencia certificado se evaluaron la veracidad y la precisión del método.

3.3.5 Determinación de nitrógeno soluble y nitrógeno total

3.3.5.1 Nitrógeno soluble

Las determinaciones de nitrógeno total se realizaron mediante un analizador de nitrógeno como el que se muestra en la Figura 15. Con el propósito de extraer el nitrógeno soluble de la muestra, se realizaron dos extracciones independientes, una extracción en agua y una extracción en un medio alcalino suave (KCl 2M), esta última explicada en la sección 3.2.3.



FIGURA 15 UNIDAD TNM-L PARA NITRÓGENO TOTAL. FUENTE: SHIMADZU.COM

La extracción en agua se llevó a cabo como primera opción, colocando una masa exacta de aproximadamente 0,2 g de muestra y llevando a un volumen de 50 mL con agua ultrapura para luego llevarlas a agitación por 40 minutos en un agitador magnético SBS40 (Shimadzu Corporation, 2020). Como segunda opción, se realizó la extracción en KCl. El sobrenadante se analizó sin más tratamiento. Para estas medidas se realizó una curva de calibración con dos niveles de concentración (250 y 500 mg L⁻¹) y el volumen de inyección de las muestras fue de 40 µL.

3.3.5.1 Nitrógeno total

El nitrógeno total fue determinado por el método Kjeldahl, el cual se realizó mediante los equipos mostrados en las Figuras 16 y 17, pertenecientes al área de Química de Alimentos de la Facultad de Química.



FIGURA 16 UNIDAD KJELDAHL KJELTEC 1002, CYTAL, FACULTAD DE QUÍMICA



FIGURA 17 MUESTRAS DIGERIDAS EN EL EQUIPO DK 6

Se pesaron 0,3 g de las muestras secas y molidas en tubos de Kjeldahl y se adicionaron 3,9 g de catalizador CuSO₄/K₂SO₄ 0,4g/3,5g, 10,0 mL de H₂SO₄ concentrado y unas 10 gotas de silicona, gota a gota y sin que toque las paredes. Los tubos se colocan en el digestor, sobre ellos el extractor de gases y se abre la canilla de la bomba de vacío. El equipo cuenta con programas de calentamiento ya definidos, en nuestro caso se utilizó programa de temperaturas descrito en la Tabla 6.

TABLA 6 PROGRAMA DE TEMPERATURA PARA LAS DIGESTIONES DE LAS MUESTRAS EN LA TÉCNICA KJELDAHL

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0 - 15	185
15 - 30	265
30 - 60	335
60 - 90	410

Cuando se observa un líquido límpido verde azulado, como se muestra en la Figura 17, la digestión se da por finalizada. Se procede a realizar la destilación colocando en el tubo del digesto 50,0 mL de agua destilada y un matraz colector con 25,0 mL de solución de ácido bórico 4% m/v y una o dos gotas de indicador mixto. Se dispensan 50,0 mL de NaOH 33% m/v por cada 10,0 mL de H₂SO₄ concentrado utilizado en la digestión de la muestra. El líquido del matraz colector se tituló con ácido clorhídrico 0,1 N.

3.3.6 *Análisis por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF)*

Como complemento a las técnicas anteriores, se realizó la determinación de los elementos metálicos presentes en las muestras mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (EDXRF) mediante el uso de un equipo como el mostrado en la Figura 18.



FIGURA 18 ESPECTRÓMETRO EDXRF SHIMADZU EDX-7200. FUENTE: SHIMADZU.COM

El método se basa en la excitación de los átomos de la muestra mediante rayos X, lo que produce la expulsión de electrones de capas internas y, tras su reemplazo por electrones de capas más externas, la emisión de fotones característicos de cada elemento; éstos se detectan y cuantifican según su energía e intensidad.

Las muestras secas y finamente molidas fueron prensadas para formar pellets utilizando una prensa hidráulica del Instituto de Física de la Facultad de Química (Figura 19). Los pellets fueron analizados directamente, sin necesidad de ningún tratamiento químico adicional. Se utilizó una fuente de rayos X de rodio en atmósfera de aire, diámetro del colimador 5 mm y con un tiempo de medida de 100 s y los datos fueron procesados con el software del equipo PCEDX Pro.



FIGURA 19 PRENSA HIDRÁULICA. INSTITUTO DE FÍSICA, FACULTAD DE QUÍMICA

4 Resultados y discusión

4.1 Porcentaje de humedad

El contenido de humedad de las muestras varió entre un mínimo de 17,2% y un máximo de 82,8% (Tabla 5), observándose una gran heterogeneidad entre las distintas muestras. Una de las muestras (CV) requirió un tiempo adicional de secado (24 hs más), ya que aún presentaba humedad visible luego del período estándar. Esta muestra corresponde al compost producido en la Facultad de Química y presentó el valor más elevado de porcentaje de humedad, lo cual puede atribuirse a un menor grado de madurez del compost, a una alta proporción de residuos frescos (con alto contenido de agua), o a una falta de control sobre el proceso de secado previo al envasado. En contraposición, algunas muestras comerciales presentaron niveles por debajo del mínimo establecido por la Resolución N.º 141/018 del MGAP, lo que puede estar asociado a procesos de deshidratación intensiva orientados a la conservación del producto o a una baja proporción de residuos húmedos en la mezcla original. Sin embargo, en su mayoría, se ajustan al rango permitido (entre 20 y 45%).

El contenido de humedad constituye un parámetro clave en la estabilidad y madurez del compost, dado que influye directamente sobre la actividad microbiana y la evolución del proceso de degradación de la materia orgánica. Valores excesivamente elevados pueden favorecer condiciones anaerobias, disminuyendo la transferencia de oxígeno y retardando los procesos de estabilización, lo que se asocia a compost inmaduros y potencialmente inestables (Cegarra, 1996; Haug, 1993). Por el contrario, contenidos de humedad demasiado bajos limitan la actividad biológica, reduciendo la velocidad de degradación de la materia orgánica y afectando la formación de compuestos húmicos estables (FAO, s.f.; Haug, 1993).

TABLA 7 PORCENTAJE DE HUMEDAD EN MUESTRAS DE COMPOST COMERCIAL Y COMUNITARIO

Muestra	%Humedad
CT	23,5 ± 0,22
CV	82,8 ± 0,40
CJ	32,4 ± 0,10
HB	17,2 ± 0,46
HL	29,0 ± 1,19
CD	38,5 ± 1,99
CTF	56,7 ± 0,40
CBV	46,7 ± 0,40
CS	18,0 ± 0,01
CQ	47,7 ± 2,84

$n=10$

4.2 Validación de las metodologías desarrolladas para la determinación de Cu, Mn y Cr

Una vez finalizada la optimización de los métodos desarrollados para la determinación de los elementos Cu, Cr y Mn, se realizó la validación de los métodos analíticos. Los resultados se presentan en la Tabla 15. La linealidad se verificó mediante la construcción de curvas de calibración de seis puntos equidistantes con tres repeticiones por nivel de concentración. La curva se evaluó visual y estadísticamente mediante el coeficiente de determinación (R^2), el cual fue superior a 0,999 en todos los casos. Se concluyó una excelente linealidad dentro de los rangos de concentración evaluados (0,005 – 0,5 mg L⁻¹ para Cr y Mn, y 0,05 – 0,5 mg L⁻¹ para Cu). La precisión se evaluó mediante estudios de repetibilidad, que incluyeron el análisis de materiales de referencia certificados y muestras replicadas ($n=6$) en condiciones idénticas. Los resultados, expresados como desviación estándar relativa (%RSD), fueron inferiores a 8,5% en todos los casos. La veracidad se evaluó mediante el análisis de material de referencia certificado a partir de las recuperaciones obtenidas (%R), las cuales se encontraron dentro del rango de 91,56 - 101,69 %.

TABLA 8 CIFRAS DE MÉRITO PARA LAS METODOLOGÍAS DESARROLLADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE COBRE, CROMO Y MANGANESO

	Cu	Cr	Mn
Técnica analítica	<i>FAAS</i>	<i>MP-AES</i>	<i>MP-AES</i>
LOQ (mg kg⁻¹)	0,019	0,115	0,151
LOD (mg kg⁻¹)	0,0059	0,38	0,489
Linealidad (mg L⁻¹)	0,05 - 0,5	0,005 - 0,5	0,005 - 0,5
Veracidad (Rec% $n=6$)	97,00	91,56	101,69
Precisión (RSD% $n=6$)	8,49	3,92	2,65

4.3 Concentración de nutrientes

4.3.1 Potasio

Las concentraciones de K total, expresadas en base seca, en las muestras analizadas variaron de forma significativa entre las diferentes muestras, en un rango entre 1,01 y 10,86 g kg⁻¹ (Tabla 6). Aunque la normativa nacional no establece valores de referencia específicos para K en compost, algunos autores proponen un contenido mínimo de 1,2 % de K₂O, lo que equivale aproximadamente a 10 g kg⁻¹ de K, como valor agronómicamente adecuado para su aplicación en suelos agrícolas (Havlin *et al.*, 2014; Tan, 2005). En este sentido, algunas de las muestras analizadas presentan niveles que pueden considerarse favorables desde el punto de vista agronómico. Por otra parte, también presentaron valores adecuados de acuerdo con la reglamentación 2019/1009 del Parlamento Europeo para los productos fertilizantes que se comercializan en la Unión Europea (concentración de potasio > 1% en masa).

TABLA 9 CONCENTRACIÓN DE POTASIO TOTAL EN MUESTRAS DE COMPOST (g kg⁻¹)

Muestra	K (g kg ⁻¹)
CT	5,12 ± 0,35
CV	5,16 ± 0,16
CJ	7,18 ± 0,17
HB	6,60 ± 0,26
HL	6,35 ± 0,42
CD	8,56 ± 2,29
CTF	8,05 ± 0,38
CBV	1,01 ± 0,08
CS	6,76 ± 0,22
CQ	10,86 ± 2,41

n=10. Resultados expresados en base seca.

Los valores obtenidos para las concentraciones de K son semejantes a referencias internacionales consultadas (Jakubus, 2022).

4.3.2 Manganeso y cromo

Las concentraciones de Mn y Cr total presentaron también una alta variabilidad entre las muestras analizadas (Tabla 7). En todos los casos, los niveles de cromo estuvieron por debajo del límite máximo de 100 mg kg⁻¹ establecido por la normativa nacional.

Si bien el Cr(III) es un nutriente esencial en pequeñas cantidades, su forma hexavalente Cr(VI) es altamente tóxica y carcinogénica. La técnica utilizada no distingue entre especies de cromo, por lo que en compost destinados a cultivos comestibles se recomienda considerar determinaciones específicas de Cr(VI) en futuros estudios.

Las concentraciones de Mn observadas en las muestras estuvieron por debajo de los valores comúnmente asociados a efectos fitotóxicos en plantas, que según estudios internacionales se sitúan entre 500 y 800 mg kg⁻¹, dependiendo de la especie vegetal y las condiciones del suelo (Petruzzelli, 1996; Chaney, 2012). Esto sugiere que, a pesar de la variabilidad entre muestras, los niveles de Mn son compatibles con su rol como micronutriente esencial y no representarían un riesgo agronómico inmediato.

TABLA 10 CONCENTRACIÓN DE MANGANESO Y CROMO TOTAL (mg kg⁻¹)

Muestra	Mn (mg kg⁻¹)	Cr (mg kg⁻¹)
CT	452,17 ± 10,68	20,52 ± 1,17
CV	3732,69 ± 255,10	2,36 ± 0,18
CJ	513,81 ± 12,76	18,05 ± 2,68
HB	302,65 ± 0,62	15,64 ± 0,34
HL	457,56 ± 56,76	14,26 ± 1,13
CD	442,17 ± 29,51	13,89 ± 1,83
CTF	252,28 ± 18,21	7,91 ± 0,94
CBV	24,06 ± 2,80	3,00 ± 0,71
CS	817,85 ± 27,79	19,38 ± 0,27
CQ	546,50 ± 81,64	12,77 ± 1,46

n=10. Resultados expresados en base seca.

Para Mn y Cr los valores obtenidos para sus concentraciones son semejantes a referencias internacionales consultadas (Silva, 2022).

4.3.3 Cobre

Los niveles de Cu se mantuvieron por debajo de 100 mg kg⁻¹, el máximo permitido por el MGAP, específicamente en el rango de 4,7 a 35,0 mg kg⁻¹ (Tabla 8). El Cu es un micronutriente esencial, pero en exceso puede volverse fitotóxico. Las concentraciones observadas podrían considerarse adecuadas para compost destinado a suelos agrícolas.

TABLA 11 CONCENTRACIÓN DE COBRE (mg kg⁻¹)

Muestra	Cu (mg kg⁻¹)
CT	23,0 ± 0,61
CV	30,1 ± 0,92
CJ	22,4 ± 0,01
HB	27,4 ± 0,03
HL	21,2 ± 0,01
CD	28,2 ± 0,05
CTF	15,3 ± 0,01
CBV	4,7 ± 0,01
CS	30,4 ± 0,04
CQ	35,0 ± 0,06

n=10. Resultados expresados en base seca.

Para Cu los valores obtenidos para sus concentraciones son semejantes a referencias internacionales consultadas (Silva, 2022).

4.3.4 Carbono

La concentración de carbono total se ubicó dentro del rango de 192,8 a 983,7 g kg⁻¹, (Tabla 9). Este parámetro es fundamental para evaluar la estabilidad y madurez del compost, así como para determinar la relación C/N. Las muestras con mayores niveles de carbono suelen corresponder a productos con alto contenido de materia orgánica parcialmente estabilizada, como humus o compost joven. Una fracción significativa del carbono detectado es presumiblemente de origen orgánico, aunque sería recomendable evaluar por separado la fracción inorgánica para futuras caracterizaciones.

TABLA 12 CONCENTRACIÓN DE CARBONO TOTAL (g kg⁻¹)

Muestra	C (g kg ⁻¹)
CT	230,1 ± 3,2
CV	983,7 ± 2,5
CJ	197,7 ± 1,1
HB	297,6 ± 1,8
HL	192,8 ± 2,1
CD	326,3 ± 2,2
CTF	874,1 ± 4,2
CBV	960,3 ± 5,3
CS	782,7 ± 5,1
CQ	250,5 ± 1,8

n=10. Resultados expresados en base seca.

4.3.5 Nitrógeno

Al analizar el sobrenadante de la extracción en agua no se obtuvo resultado significativo de extracción de nitrógeno. Para la extracción en KCl los resultados mostraron valores variables de nitrógeno soluble, los cuales se encontraron en el rango de 0,03 a 0,15 % (Tabla 10). El nitrógeno soluble representa la fracción mineral fácilmente disponible (principalmente como iones amonio y nitrato) para las plantas (Haug, 1993; Tan, 2005). Valores dentro de este rango suelen asociarse a compost en etapa de madurez intermedia a avanzada, donde la mayor parte del nitrógeno se encuentra en formas orgánicas estables, pero aún se conserva una fracción mineralizable que puede liberar nutrientes de forma progresiva (Cegarra, 1996; Farrell *et al.*, 2010). La presencia de una fracción soluble moderada (0,03–0,16 %) también sugiere un riesgo bajo de pérdidas por lixiviación, ya que los niveles excesivamente altos (> 0,3 %) se asocian con compost inmaduros y con posible liberación rápida de amonio o nitratos al medio (Petruzzelli, 1996; Azim *et al.*, 2018). Por tanto, los valores obtenidos respaldan la calidad de las muestras tanto en términos de contenido nutricional como de estabilidad. Por otra parte, los valores de N total se encontraron en el rango de 0,88 a 3,49 %. Según el MGAP, el nitrógeno total debe ser superior al 0,5% en base seca, umbral que fue alcanzado por todas las muestras.

TABLA 13 CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL (KJELDAHL) Y SOLUBLE (TNM-L) (g kg⁻¹)

Muestra	%N total	% N soluble
CT	1,30 ± 0.01	0,05 ± 0,01
CV	3,49 ± 0.02	0,14 ± 0,02
CJ	0,88 ± 0.05	0,04 ± 0,01
HB	1,22 ± 0.03	0,07 ± 0,01
HL	0,85 ± 0,2	0,10 ± 0,02
CD	1,15 ± 0.02	0,15 ± 0,02
CTF	1,57 ± 0.01	0,06 ± 0,01
CBV	0,93 ± 0.01	0,03 ± 0,01
CS	1,16 ± 0,02	0,08 ± 0,01
CQ	1,64 ± 0.02	0,16 ± 0,01

n=10. Resultados expresados en base seca.

4.3.6 Relación C/N

La relación C/N se encontró en el rango de 6,6 a 103,6 (Tabla 11). La mayoría de las muestras comerciales presentaron relaciones adecuadas según el MGAP (<30), mientras que cuatro de ellas presentaron valores significativamente más elevados y no aceptables (>30) y dentro de los cuales se encuentra el compost elaborado en Facultad de Química (CV). Este resultado sugiere que dichos compost podrían beneficiarse de una fase adicional de maduración antes de su uso agrícola.

La relación C/N constituye uno de los indicadores más utilizados para evaluar el grado de madurez del compost. Durante el proceso de compostaje, el carbono se consume principalmente como fuente de energía microbiana y se pierde en forma de CO₂, mientras que el nitrógeno tiende a conservarse en el sistema, lo que conduce a una disminución progresiva de la relación C/N (Haug, 1993; Castells, 2005).

En las muestras analizadas, aquellas que presentaron relaciones C/N inferiores a 30 se corresponden con valores considerados adecuados según la normativa nacional y normas internacionales, indicando compost estabilizados y aptos para su aplicación agrícola (MGAP, 2018; Castells, 2005). Por el contrario, los valores elevados de C/N observados en algunas muestras, particularmente en el compost CV, sugieren un mayor contenido relativo de carbono o una menor disponibilidad de nitrógeno, lo que es característico de materiales en proceso de estabilización que podrían beneficiarse de un período adicional de maduración (Azim et al., 2018).

Estos resultados resultan coherentes con otros parámetros evaluados, como el elevado contenido de humedad registrado para dicha muestra, reforzando la interpretación de un menor grado de madurez del compost.

TABLA 14 RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO CALCULADA PARA LAS MUESTRAS

Muestra	C (g kg⁻¹)	N total (g kg⁻¹)	C/N
CT	230,1	34,9	6,6
CV	983,7	13,0	75,8
CJ	197,7	8,8	22,4
HB	297,6	12,2	24,5
HL	192,8	8,5	22,8
CD	326,3	11,5	28,4
CTF	874,1	15,7	55,6
CBV	960,3	9,5	103,6
CS	782,7	11,6	67,4
CQ	250,5	16,4	15,2

n=10. Resultados expresados en base seca.

4.4 Evaluación de la concentración de Mn, K, Cu y Cr por EDXRF

La espectrometría de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) permitió obtener el perfil de concentraciones de los elementos metálicos presentes en las muestras, como se detalla en la Tabla 14.

TABLA 15 CONCENTRACIONES ELEMENTALES DETERMINADAS POR EDXRF

Muestra	K (g kg⁻¹)	Cr (mg kg⁻¹)	Mn (mg kg⁻¹)	Cu (mg kg⁻¹)
CT	6,52	11,47	388,63	21,24
CV	7,87	2,57	7143,65	54,38
CJ	6,64	9,80	450,45	22,12
HB	6,21	12,91	425,87	23,08
HL	6,30	10,48	441,02	22,05
CD	8,63	13,74	427,06	27,69
CTF	7,94	8,27	477,85	25,10
CBV	2,34	1,29	72,92	12,87
CS	5,65	12,14	632,50	22,41
CQ	6,79	5,40	462,28	25,19

n=10. Resultados expresados en base seca.

Una de las ventajas de esta técnica es que, en lugar de utilizar una curva de calibración estándar convencional, se puede trabajar utilizando parámetros fundamentales, que permite una muestra con concentraciones conocidas como referencia interna. De esta forma se puede ajustar directamente la respuesta del equipo y calcular las concentraciones de los demás elementos en las otras muestras analizadas. Otra de sus ventajas radica en la mínima preparación de la muestra necesaria y que no se emplean reactivos como ácidos fuertes, disminuyendo tanto el costo como la exposición del analista a los mismos, alineándose con los principios de la química analítica verde (Gałuszka, Migaszewski & Namieśnik, 2013). En contraparte, la técnica presenta limitaciones para elementos ligeros como el carbono o el nitrógeno, o para elementos en concentraciones a nivel de trazas.

Con el fin de evaluar la concordancia entre los resultados obtenidos mediante diferentes técnicas analíticas, se realizó un test *t* de Student para comparación de medias. Para cada elemento (Cu, Cr, K y Mn), se compararon las medias de los valores obtenidos a través de dos métodos distintos: FAAS vs EDXRF para Cu y K, y MP AES vs EDXRF para Cr y Mn. Previo a la aplicación del test *t*, se analizó la homogeneidad de varianzas para cada par de datos. En los casos de Cr, K y Mn las varianzas resultaron homogéneas, mientras que para Cu se detectó heterogeneidad, aplicándose en consecuencia el test *t* correspondiente para ambos casos. Los resultados se detallan en la Tabla 15, donde se presenta, para cada elemento, la cantidad de datos analizados (*n*), las medias obtenidas por cada técnica, el valor crítico (*t* crítico) y el valor experimental calculado (*t* experimental).

TABLA 16 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO PARA LAS DETERMINACIONES DE METALES A PARTIR DE LAS DISTINTAS TECNICAS UTILIZADAS

	Cu		Cr		K		Mn	
n	8		8		10		7	
varianzas	no homogéneas		homogéneas		homogéneas		homogéneas	
media	FAAS	EDXRF	MP	EDXRF	FAES	EDXRF	MP AES	EDXRF
	25,36	24,30	13,34	9,88	5,67	6,72	504,67	460,60
t crítico	2,26		2,17		2,1		2,18	
T experimental	0,46		0,43		-0,34		0,21	

La comparación entre t experimental y t crítico permite determinar si existen diferencias significativas entre las medias obtenidas por ambas técnicas analíticas. Para todos los elementos evaluados, los valores de t experimental fueron menores que los valores de t crítico, esto indica que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos por las distintas técnicas para ninguno de los elementos analizados, al nivel de confianza del 95 %. Por lo tanto, puede afirmarse que las técnicas utilizadas son comparables en cuanto a la determinación de Cu, Cr, K y Mn en las muestras analizadas, avalando la técnica de EDXRF como una alternativa rápida y no destructiva para el análisis de compost.

Si bien no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las técnicas analíticas empleadas, las pequeñas discrepancias entre los valores obtenidos por EDXRF y las técnicas clásicas pueden atribuirse a factores inherentes a la naturaleza de cada metodología. En particular, en la técnica EDXRF pueden presentarse efectos de matriz asociados a la composición global de la muestra, tales como variaciones en la densidad, granulometría y contenido de materia orgánica, que influyen en la absorción y emisión de la radiación característica. Por otra parte, las técnicas clásicas requieren una etapa previa de digestión ácida, durante la cual pueden producirse pérdidas parciales del analito o efectos asociados a la eficiencia de la extracción, especialmente en matrices complejas como el compost. Asimismo, la preparación de pellets para EDXRF, aunque no destructiva, puede introducir variaciones vinculadas a la homogeneidad del prensado y a la distribución del analito en la muestra sólida. No obstante, dado que estas diferencias se mantuvieron dentro del margen de incertidumbre experimental y no resultaron estadísticamente significativas, los resultados obtenidos confirman la comparabilidad entre las técnicas evaluadas, respaldando el uso de EDXRF como una alternativa rápida y no destructiva para el análisis de metales en compost.

5 Conclusiones

El desarrollo de metodologías para la determinación de micro y macronutrientes en muestras de compost permitió evaluar parámetros clave para determinar la calidad desde el punto de vista de micro y macronutrientes y madurez del producto. Los resultados mostraron una gran heterogeneidad entre las muestras, tanto en contenido de humedad como en concentración de analitos. En general, los compost comerciales analizados cumplen con los requisitos mínimos establecidos por la normativa uruguaya (Resolución N.º 141/018 del MGAP), con relación a contenido de nitrógeno total, valores de C/N y límites de metales pesados como cobre y cromo. No obstante, algunas formulaciones presentaron valores cercanos a los límites permitidos, lo que podría comprometer su estabilidad o valor agronómico si no se monitorean adecuadamente.

Desde el punto de vista analítico, la combinación de técnicas clásicas y modernas —como el método Kjeldahl, la espectrometría de emisión atómica (MP-AES) la espectrometría de absorción atómica (FAAS), el análisis mediante analizador de carbono total (TOC) y analizador de nitrógeno (TNM), y espectroscopía de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (EDXRF)— resultó adecuada para la caracterización integral de los compost. Las determinaciones por diferentes vías permitieron validar métodos, obtener un perfil amplio de nutrientes y contaminantes y contrastar resultados.

Asimismo, se destaca la utilidad de técnicas rápidas como EDXRF para determinar la concentración de Mn, K, Cu y Cr en muestras de compost con mínima preparación, aunque su uso no sustituye completamente a otras técnicas, especialmente para elementos livianos como carbono y nitrógeno.

Este estudio, además de aportar al conocimiento sobre la calidad del compost disponible en el mercado y en espacios comunitarios, permite identificar oportunidades de mejora en la gestión de residuos orgánicos. En particular, la implementación de prácticas de monitoreo simples, como el control de la humedad, es imprescindible para asegurar su uso seguro en suelos agrícolas o huertas urbanas, y en el caso particular del compost comunitario estudiado sería recomendable prolongar la fase de curado y mejorar el control de las condiciones del proceso de compostaje. Un mayor conocimiento por parte de la población de la implicancia de los parámetros determinados a lo largo de este trabajo podría mejorar significativamente la estabilidad y eficacia del compost producido en iniciativas comunitarias, favoreciendo así su aplicación segura y efectiva en huertas urbanas, jardines y proyectos de agricultura sostenible.

6 Referencias

- Adani, F., Genevini, P., Gasperi, F., & Tambone, F. (1999). Composting and humification. *Compost Science & Utilization*, 7(1), 24–33.*
- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Alami, I. T. (2018). Composting parameters and compost quality: A literature review. *Organic Agriculture*, 8, 141–158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Díaz de Santos.
- Cegarra, J. (1996). *Compostaje de residuos orgánicos: Fundamentos y aplicaciones*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Chaney, R. L. (2012). Toxic elements in compost and soil amendment products. En H. M. Selin (Ed.), *Handbook of Composting and Recycling*. Elsevier.
- Christian, A., Evanylo, G., & Pease, J. (2009). *On-farm composting: A guide to principles, planning and operations* (36 p.). Virginia Cooperative Extension. <https://www.pubs.ext.vt.edu/442/442-005/442-005.html>
- de Souza Andrade Fontes, K. D., Lima de Castro, A. C., Drumond Ferreira, T. E., & Panarelli, E. A. (2021). A compostagem como instrumento de educação ambiental em escolas do Município de João Monlevade – MG. *Research, Society and Development*, 10(10), e410101018863. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18863>
- Docampo, R. (2013). Compostaje: una alternativa para el manejo y valorización de residuos orgánicos. *Revista INIA*, (63), 63–67.
- Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. Y., & Schroeder, E. D. (1999). *Bioremediation principles*. McGraw-Hill.
- Falchi, L., Pizzorno, P., Iaquina, F., & Cousillas, A. (2018). Relevamiento de la concentración de arsénico total en agua en una zona arroceras del Uruguay. *INNOTECH*, 17, 10–17.
- Farrel, M., Perkins, M. T., Hobbs, P. J., Griffith, G. W., & Jones, D. L. (2010). Migration of heavy metals in soil as influenced by compost amendments. *Environmental Pollution*, 158, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.08.027>
- Gałaszka, A., Migaszewski, Z. M., & Namieśnik, J. (2013). The 12 principles of green analytical chemistry and the SIGNIFICANCE mnemonic of green analytical practices. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 50, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.04.010>

- Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers* (8th ed.). Pearson Education.
- IM Canelones. (s.f.). *Guía de compostaje domiciliario*. Intendencia de Canelones. https://www.imcanelones.gub.uy/Gu%C3%ADa_de_compostaje_domiciliario.pdf
- Iaquinta, F., Antelo, E., & Machado, I. (2023). Distribution of inorganic contaminants along the coast of Ciudad de la Costa, Uruguay. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 85, 349–359. <https://doi.org/10.1007/s00244-023-01029-7>
- Iaquinta, F., Gómez, M., Levero, D., & Cousillas, A. (2020). Educación comunitaria hacia una gestión sostenible de los residuos sólidos. *EXT*, 11. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/ext/article/view/30556>
- Knudsen, D., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (2015). Lithium, sodium, and potassium. En *Agronomy* (pp. 225–246). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c1>
- Krug, F. J., & Piovezani Rocha, F. R. (2016). *Métodos de preparo de amostras para análise elemental*. Sociedade Brasileira de Química.
- Langenkamp, H., & Marmo, L. (2002). *Biological treatment of biodegradable waste: Technical aspects*. European Commission.
- Machado, I., & Tissot, F. (2020). Dispersive liquid–liquid microextraction to increase ETAAS sensitivity in bovine meat. *Talanta*, 212, 120783. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120783>
- Magnusson, B., & Örnemark, U. (2014). *The fitness for purpose of analytical methods: A laboratory guide to method validation and related topics* (2nd ed.). EURACHEM. <https://www.eurachem.org>
- Massart, D. L., Vandeginste, B. G. M., Buydens, L. M. C., De Jong, S., Lewi, P. J., & Smeyers-Verbeke, J. (1997). *Handbook of chemometrics and qualimetrics: Part A*. Elsevier.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). (2018). *Requisitos técnicos para el registro de enmiendas orgánicas*. Resolución N.º 141/018. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/requisitos-tecnicos-enmiendas-organicas>
- NC Composting Council. (s.f.). *Compostaje a gran escala*. U.S. Composting Council. Recuperado el 15 de julio de 2025, de <https://carolinacompost.com/compostaje-a-gran-escala/>

- Pereira, M., Tissot, F., Faccio, R., Ibáñez, F., & Pistón, M. (2021). Ultrasound-assisted method for Cd and Pb extraction from fruits and vegetables. *Results in Chemistry*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100076>
- Petruzzelli, G. (1996). Heavy metals in compost and their effect on soil quality. En M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, & T. Papi (Eds.), *The science of composting* (pp. 213–222). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1569-5_21
- Piedad Martín Olmedo, J. (1993). Mineralización del nitrógeno orgánico en suelos tratados con compost de alpechín y vinaza concentrada de melaza de remolacha.
- Planta de Tratamiento de Residuos Orgánicos TRESOR, Intendencia de Montevideo, Departamento de Desarrollo Ambiental, Gerencia de Gestión Ambiental. (2024). *Informe interno*.
- Pozebon, D., Müller, A., & Dressler, V. L. (2020). Advances in nitrogen microwave plasma for optical emission spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35, 2459–2481. <https://doi.org/10.1039/D0JA00272K>
- Rodrigues, P. N. F., Rolim, M. M., Bezerra Neto, E., Costa, R. N. T., Pedrosa, E. M. R., & Oliveira, V. S. (2011). Efeito do composto orgânico e compactação do solo no milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(8). <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800004>
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. FAO.
- Rosal, A., Pérez, J. P., Arcos, M. A., & Dios, M. (2007). La incidencia de metales pesados en compost de residuos sólidos urbanos. *Información Tecnológica*, 18, 75–82.
- Selinus, O. (Ed.). (2005). *Essentials of medical geology: Impacts of the natural environment on public health*. Elsevier Academic Press.
- Shimadzu Corporation. (2020). Analysis of TOC and TN in fertilizers (Application News No. O80). Shimadzu Corporation. <https://www.shimadzu.com/an/>
- Silva, J., Bühl, V., Iaquinta, F., & Pistón, M. (2023). Simultaneous determination of Mn and Fe in beef via ultrasonic bath. *Heliyon*, 9, e20967. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20967>
- Silva, J. P., López, P., & Valencia, P. (2004). Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. *Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Universidad del Valle – Facultad de Ingeniería*.

- Skoog, D. A., Leary, F. J., & Crouch, S. R. (2008). *Principios de análisis instrumental* (6.^a ed.). Cengage Learning.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2005). *Fundamentos de química analítica* (8.^a ed.). International Thomson Editores Spain.
- Tan, K. H. (2005). *Soil sampling, preparation, and analysis* (2nd ed.). CRC Press.
- Terra.org. (2024). La materia orgánica: un recurso para el suelo. <https://www.terra.org/sites/default/files/2024-04/pa29e.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Ecological soil screening levels for manganese (Interim final)* (OSWER Directive 9285.7-71). Office of Solid Waste and Emergency Response. <https://www.epa.gov/eco-research/ecological-soil-screening-level-eco-ssl-guidance-and-documents>
- Wheatley, R. E., MacDonald, R., & Smith, A. M. (1989). Extraction of nitrogen from soils. *Biology and Fertility of Soils*, 8, 189–190.
- Wheatley, R. E., MacDonald, R., & Smith, A. M. (s.f.). Extraction of nitrogen from soils. *Scottish Crop Research Institute*, Invergowrie, Dundee, UK.
- Zhang, Y., Li, X., & Wang, J. (2022). Evaluation of agricultural value of composts prepared from municipal biowastes in different conditions of composting process. *Agronomy*, 12(6), 1438. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061438>
- Zhou, L., Chen, M., & Huang, R. (2022). Distinctive features of composts of different origin: A thorough examination of the characterization results. *Sustainability*, 14(12), 7449.