Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

DESARROLLO DE UN SUSTRATO COMPOSTABLE A BASE DE RESIDUOS AGRÍCOLAS PARA ENCAPSULAMIENTO DE DESECHOS FELINOS

Jennifer Rangel Trejo[1]; Alejandro León León[1]; Sergio Arturo García Gutiérrez[2]; J. Guadalupe García Rodriguez[2]

[1]Estudiante del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Roque, [2]Profesor-Investigadro del TecNM/ Instituto Tecnológico de Roque.

RESUMEN

Las arenas para gatos de origen mineral presentan limitaciones ambientales y sanitarias derivadas de procesos mineros y de la generación de partículas finas respirables. El presente trabajo describe el desarrollo, formulación y caracterización funcional de un sustrato ecoamigable elaborado a partir de residuos orgánicos certificados de invernadero, enriquecido con perlita agrícola como componente funcional de encapsulamiento. El sustrato aprovecha la estructura porosa de ambos materiales para retener y encapsular desechos sólidos y líquidos de felinos mediante mecanismos físicos naturales, sin aglutinantes químicos sintéticos. Las evaluaciones preliminares demuestran alta capacidad de absorción de líquidos, neutralización eficaz del pH urinario (6.8–7.2), mínima generación de polvo y control de olores por inhibición microbiana anaerobia. El material es 100% biodegradable, compostable y formulado bajo principios de economía circular que valorizan residuos agrícolas de bajo costo. Los resultados posicionan al sustrato desarrollado como una alternativa técnicamente fundamentada a los materiales convencionales para el manejo de desechos felinos.

Palabras clave: *sustrato compostable, encapsulamiento de residuos, desechos felinos, residuos agrícolas, biodegradabilidad, economía circular.*

INTRODUCCIÓN

El manejo de desechos sólidos y líquidos generados por animales de compañía en entornos domésticos constituye un problema ambiental y sanitario de creciente relevancia. En el caso de los felinos, los materiales utilizados tradicionalmente —principalmente arcillas minerales de bentonita y sílice— son obtenidos mediante procesos de extracción minera de alto impacto ambiental y presentan riesgos documentados para la salud de los animales y las personas que conviven con ellos (Grand View Research, 2023). A pesar de dominar el 88.5% del mercado global en este segmento, estos materiales carecen de propiedades de biodegradación, generan partículas respirables durante su manipulación y no son susceptibles de reintegración al ciclo de materia orgánica.

La exposición crónica al polvo de sílice cristalina —clasificado como carcinógeno del Grupo 1 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC)— representa un riesgo pulmonar significativo tanto para los felinos como para sus propietarios (IARC, s.f.; Lee & Kim, 2017). Adicionalmente, los compuestos químicos presentes en estos materiales pueden desencadenar cuadros de asma felina, dermatitis alérgica y otras patologías de origen inflamatorio, comprometiendo el bienestar de las mascotas (Smith, 2020). Desde la perspectiva ambiental, la disposición de estos residuos en rellenos sanitarios no permite su degradación y representa un pasivo ecológico de lenta resolución.

Frente a esta problemática, la investigación en sustratos de origen orgánico ha cobrado impulso en los últimos años. Materiales como las virutas de madera reciclada (Ökocat), los granos de maíz procesados (World's Best Cat Litter) o el sustrato de coco (CocoPet) han demostrado la viabilidad técnica de los materiales de origen vegetal para el manejo de desechos felinos, aunque ninguno de ellos aprovecha los residuos generados en sistemas de producción agrícola protegida —invernaderos— como materia prima principal (García & Johnson, 2019; Chen et al., 2016). Los sustratos de invernadero, al término de su ciclo productivo, presentan una estructura físico-química favorable para funciones de retención y encapsulamiento de materia orgánica, y su reutilización representa una oportunidad concreta de valorización bajo los principios de la economía circular.

El presente trabajo tiene como objetivo describir el desarrollo y la caracterización funcional de un sustrato ecoamigable formulado a partir de residuos de invernadero certificados y perlita agrícola, evaluando su capacidad de encapsulamiento y almacenamiento de desechos sólidos y líquidos felinos mediante mecanismos físicos naturales. Se analiza asimismo la viabilidad técnica, normativa y económica del material desarrollado, con énfasis en la región del Bajío mexicano como contexto de aplicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del sustrato ecoamigable siguió una metodología estructurada en tres fases: (1) selección, caracterización y formulación de las materias primas; (2) evaluación funcional de las propiedades de encapsulamiento, retención y control de desechos; y (3) análisis de viabilidad técnica, normativa y económica para su escalado productivo.

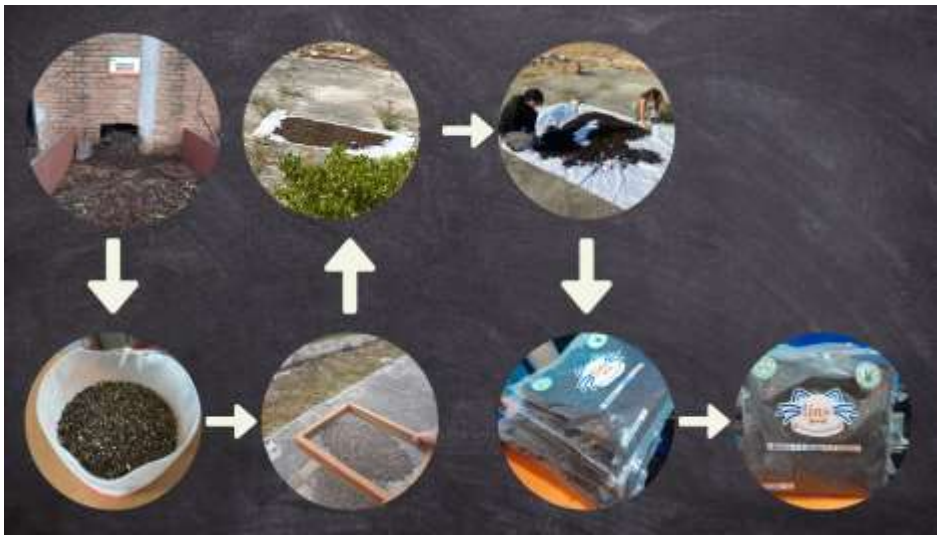

Figura 1. Diagrama del proceso del desarrollo del sustrato.

La materia prima principal del sustrato es el residuo orgánico de invernadero certificado, obtenido en colaboración con ProtoPlanta (San Antonio de Romerillo #38255, Apaseo el Grande, Guanajuato), proveedor con trazabilidad documentada en el manejo de sustratos agrícolas. El material cumple con criterios de ausencia de agentes patógenos, residuos de pesticidas de alta toxicidad y metales pesados, condición indispensable para su aplicación en contextos de contacto con animales domésticos. Su estructura físico-química —rica en materia orgánica parcialmente descompuesta y con elevada porosidad intergranular— le confiere propiedades intrínsecas de retención de humedad y actividad tamponadora del pH.

Figura 2. Residuo orgánico de invernadero certificado en etapa de recepción y preparación para limpieza, previo a su incorporación como materia prima del sustrato ecoamigable.

Como componente funcional complementario se incorporó perlita agrícola, un mineral volcánico expandido de origen natural, ampliamente caracterizado en la literatura especializada por su estructura vesicular abierta, baja densidad, alta porosidad y capacidad de retención hídrica de hasta 3–4 veces su peso en agua. Esta propiedad resulta determinante para el mecanismo de encapsulamiento físico de los desechos líquidos, al crear microambientes de retención que limitan la difusión de compuestos odoríferos hacia el ambiente y restringen el desarrollo de microorganismos anaerobios. La proporción de mezcla entre sustrato de invernadero y perlita fue definida experimentalmente con base en los resultados de absorción y control de pH.

El proceso de formulación del sustrato comprende las siguientes etapas secuenciales: (1) recepción y verificación de la calidad del lote de residuo certificado; (2) mezcla homogénea del sustrato de invernadero con perlita agrícola en proporción definida; (3) acondicionamiento de la mezcla para garantizar la distribución uniforme de la fracción porosa en toda la masa del sustrato; y (4) inspección y control de calidad de cada lote previo a su salida. El proceso es realizado en las instalaciones de ProtoPlanta bajo supervisión técnica del equipo de investigación.

Figura 3. Sustrato de invernadero en proceso de purificación de impurezas tras la etapa de secado, correspondiente a la fase de acondicionamiento de la mezcla previo al control de calidad.

Las propiedades funcionales del sustrato fueron evaluadas mediante las siguientes pruebas: (a) *capacidad de absorción y encapsulamiento de desechos líquidos*, por medio de pruebas realizadas con felinos en tiempo real, para cuantificar la retención volumétrica por unidad de masa de sustrato; (b) *neutralización del pH de los desechos líquidos*, medida con tiras reactivas antes y después de la absorción; (c) *control de emisiones odoríferas*, mediante evaluación sensorial comparativa frente a material convencional de bentonita; y (d) *generación de partículas en suspensión*, evaluada cualitativamente mediante observación directa durante la manipulación del sustrato, comparando la liberación de polvo respecto a materiales minerales de referencia.

La viabilidad normativa fue analizada en función de la NOM-012-ZOO-1993 (modificación 2004) para productos de uso en animales, los estándares EPA para materiales compostables, la normativa OSHA de seguridad

ocupacional y los criterios de certificación USDA Organic y Green Seal. Para la viabilidad de mercado se realizó un estudio mixto en el municipio de Apaseo el Alto, Guanajuato, y sus alrededores, mediante encuestas a dueños de gatos con nivel socioeconómico medio-alto, complementado con datos secundarios de industria (Grand View Research, 2023). La proyección económica se desarrolló para un horizonte de cinco años, con estructura de costos basada en la producción en instalaciones de ProtoPlanta y distribución mixta a través de canales especializados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las evaluaciones funcionales preliminares demuestran que la combinación de sustrato de invernadero y perlita agrícola presenta una capacidad de absorción y retención de desechos líquidos superior a la observada en materiales convencionales de bentonita bajo condiciones de laboratorio. El mecanismo de encapsulamiento opera a través de la estructura vesicular abierta de la perlita, que actúa como reservorio físico de la fase líquida del desecho, mientras que la fracción orgánica del sustrato de invernadero contribuye al tamponamiento químico del medio. Esta combinación limita eficazmente la migración de la fracción líquida fuera del volumen de sustrato activo, condición fundamental para el control de olores y la higiene del sistema.

El pH de la solución absorbida registró valores de 6.8 a 7.2, indicando una capacidad tamponadora eficaz del material. Este rango de pH es desfavorable para el desarrollo de bacterias ureolíticas responsables de la hidrólisis de la urea —compuesto mayoritario de la orina felina— y la consecuente liberación de amoniaco, principal responsable del olor característico de los desechos felinos. La inhibición de este proceso a nivel de pH representa, por tanto, el principal mecanismo de control de olores del sustrato, a diferencia de los enmascarantes químicos o aromatizantes artificiales utilizados en materiales convencionales.

En cuanto al almacenamiento de desechos sólidos, la textura granular del sustrato —comparable a la tierra exterior— favorece el recubrimiento natural de las heces mediante el comportamiento instintivo de enterramiento de los felinos, lo que contribuye al encapsulamiento pasivo de los desechos sólidos sin necesidad de aditivos aglomerantes. Este mecanismo fue verificado en pruebas de uso doméstico observadas, donde se registró aceptación inmediata del sustrato por parte de los animales, reduciendo la resistencia comportamental al cambio de material, identificada en la literatura como uno de los principales obstáculos en la adopción de sustratos alternativos (Patel & Brown, 2018).

Figura 3. Prueba de aceptación y uso del sustrato ecoamigable en ejemplares felinos sin exposición previa a materiales de arenero convencional. Se registró adopción inmediata del material, consistente con su textura de origen orgánico.

Figura 4. Prueba de aceptación del sustrato ecoamigable en ejemplares felinos previamente habituados al uso de arenas minerales convencionales. La aceptación observada reduce la resistencia comportamental al cambio de material (Patel & Brown, 2018)

La generación de polvo durante la manipulación del sustrato desarrollado fue cualitativamente nula, en marcado contraste con los materiales de bentonita y sílice, que liberan partículas finas visibles al verter o remover el producto. Esta diferencia tiene implicaciones directas en la seguridad sanitaria del sistema: la sílice cristalina, clasificada como carcinógeno del Grupo 1 por la IARC, genera exposición respiratoria continua tanto para los gatos —que permanecen períodos prolongados en contacto directo con el material y lo ingieren durante el acicalamiento— como para sus propietarios durante el manejo cotidiano del arenero (IARC, s.f.; Lee & Kim, 2017). La ausencia de partículas respirables en el sustrato desarrollado elimina este vector de exposición, constituyendo una ventaja funcional de primer orden frente a los materiales minerales convencionales.

El Cuadro 1 sintetiza la comparación entre el sustrato desarrollado y los principales materiales de referencia disponibles en el mercado, tanto convencionales como de origen orgánico, considerando los atributos funcionales relevantes para el encapsulamiento y almacenamiento de desechos felinos.

Cuadro 1. Comparación funcional del sustrato ecoamigable desarrollado frente a materiales de referencia para el manejo de desechos felinos.

Característica	Sustrato desarrollado	Ökocat	World's Best	CocoPet	Bentonita
Materia prima	Residuo de invernadero certificado	Madera reciclada	Maíz	Coco	Minería de arcilla

Biodegradable	Sí (100%)	Sí	Sí	Sí	No
Origen en residuos agrícolas certificados	Sí	No	No garantizado	Sí	No
Hipoalergénico	Sí	No certificado	No certificado	Sí	No
Mecanismo de encapsulamiento	Físico-poroso (perlita + sustrato)	Absorción fibra	Aglomeración	Absorción fibra	Aglomeración química
Generación de polvo	Nula	Baja	Baja	Baja	Alta
Control de olores	Alto	Medio	Alto	Medio	Bajo

Fuente: Elaboración propia con base en datos de campo y revisión bibliográfica.

El sustrato desarrollado presenta el único perfil que combina origen en residuos agrícolas certificados, mecanismo de encapsulamiento físico-poroso, nula generación de polvo y biodegradabilidad completa. Los materiales de origen vegetal disponibles comercialmente (Ökocat, World's Best, CocoPet) cumplen con el criterio de biodegradabilidad pero no garantizan la procedencia certificada de sus materias primas ni ofrecen un mecanismo de encapsulamiento físico-poroso equivalente al conferido por la combinación sustrato de invernadero–perlita agrícola.

Una de las ventajas diferenciadas del sustrato desarrollado respecto a los materiales minerales convencionales reside en su comportamiento al término del ciclo de uso. Al estar formulado íntegramente con materiales de origen orgánico —sustrato de invernadero y perlita de origen volcánico natural—, el material usado puede incorporarse a procesos de compostaje o biodigestión, reintegrando los nutrientes presentes en los desechos felinos al ciclo de la materia orgánica. Este atributo es consistente con los principios de la economía circular y con los estándares de certificación de materiales compostables de la EPA, en los que el sustrato desarrollado está siendo evaluado para su futura acreditación.

La fracción orgánica del residuo de invernadero, enriquecida con los desechos felinos absorbidos, presenta potencial de uso como enmienda orgánica agrícola tras el proceso de compostaje, cerrando el ciclo de valorización del residuo en el mismo sistema productivo del que proviene la materia prima. Esta posibilidad, objeto de investigación futura, abriría un modelo de gestión circular de residuos agrícolas y domésticos de alta pertinencia para regiones de producción intensiva en invernadero como el Bajío mexicano.

El sustrato formulado se ajusta a los requisitos de la NOM-012-ZOO-1993 (modificación 2004) para productos destinados al contacto con animales. La composición íntegramente orgánica del material es compatible con los estándares EPA para materiales compostables, y la ausencia de pesticidas, patógenos y metales pesados en la materia prima garantizada por ProtoPlanta facilita la trayectoria hacia la certificación USDA Organic y Green Seal como objetivos estratégicos de mediano plazo.

CONCLUSIONES

Se desarrolló y caracterizó un sustrato ecoamigable formulado a partir de residuos orgánicos certificados de invernadero y perlita agrícola, con capacidad demostrada de encapsulamiento y almacenamiento de desechos sólidos y líquidos felinos mediante mecanismos físicos naturales, sin el uso de aglutinantes ni aditivos químicos sintéticos.

Las evaluaciones funcionales preliminares confirman que el sustrato presenta alta capacidad de retención de desechos líquidos, neutralización eficaz del pH urinario que inhibe la actividad ureolítica microbiana, nula generación de partículas respirables durante la manipulación y control de olores por mecanismos físico-químicos naturales.

La ausencia de sílice cristalina y la nula generación de polvo eliminan el principal riesgo sanitario de los materiales convencionales, reduciendo la exposición crónica de felinos y propietarios a partículas clasificadas como carcinógenas por la IARC.

La biodegradabilidad completa del material y su origen en residuos agrícolas valorizados lo posicionan como una solución técnicamente fundamentada bajo los principios de la economía circular, con potencial de integración a cadenas de compostaje al término de su ciclo de uso.

Se proponen la cuantificación rigurosa de la capacidad de encapsulamiento mediante protocolos estandarizados de retención; pruebas de biodegradabilidad según normas ISO 14855 y ASTM D5338; estudios de aceptación controlada con poblaciones felinas más amplias; y la obtención de certificaciones nacionales e internacionales que acrediten el desempeño ambiental del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen, Y., Zhang, H., Liu, X., Wang, F. y Zhou, Q. (2016). Biodegradable cat litter: A review of current technologies. Waste Management Research, 30(5), 578–589.

García, M. y Johnson, L. (2019). Biodegradable cat litter: Environmental implications. Ecological Management Journal, 8(2), 67–78.

Grand View Research. (2023). U.S. Cat Litter Products Market size, by product type, 2020-2030. https://www.grandviewresearch.com

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). (2024). Búsqueda de marcas y patentes. https://www.gob.mx/impi

International Agency for Research on Cancer (IARC). (s.f.). IARC Monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. Organización Mundial de la Salud.

Lee, S. y Kim, H. (2017). Effects of cat litter on indoor air quality: A comparative study. Indoor Environmental Health Journal, 5(1), 89–102.

Patel, R. y Brown, K. (2018). Consumer preferences for eco-friendly pet products: A market analysis. Journal of Consumer Behavior, 22(4), 456–468.

Rodríguez, A. y Martínez, C. (2014). Biodegradable materials for pet waste management: A comprehensive review. Waste Technology Journal, 18(3), 341–355.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2004). NOM-012-ZOO-1993, Especificaciones para la regulación de productos químicos, farmacéuticos, biológicos y alimenticios para uso en animales o consumo por éstos. Diario Oficial de la Federación.

Smith, J. (2020). Sustainability in pet care products. Journal of Environmental Science and Technology, 15(3), 123–135.

Thompson, D. y Clark, R. (2015). Environmental impact assessment of cat litter disposal methods. Environmental Management, 25(2), 213–225.