

CAPÍTULO 33.

CORRELACIÓN ENTRE LA EFICACIA TÉCNICA PERCIBIDA Y LA IMPLEMENTACIÓN REAL DE MEDIDAS DE CONTROL AMBIENTAL EN EL CIERRE DE BOTADEROS: UNA REVISIÓN NARRATIVA

Juan Carlos Quijandria Lavarello¹
Juan Carlos Alfredo Toledo Guerra²
José Abelardo Castillo Navarro³
Jorge Luis De La Cruz Martinez⁴

¹: Ingeniero ambiental.

 <https://orcid.org/0000-0003-0710-2096>

²: Ingeniero químico.

 <https://orcid.org/0009-0006-1532-3744>

³: Ingeniero químico.

 <https://orcid.org/0000-0001-6777-4260>

⁴: Ingeniero ambiental.

 <https://orcid.org/0000-0001-6703-3681>

RESUMEN

Este estudio examinó, mediante una revisión narrativa crítica de 42 publicaciones (2000-2023), la correlación entre la eficacia técnica percibida (ETP) y la implementación real (IR) de medidas de control ambiental (MCA) en el cierre de botaderos a cielo abierto. Se encontró una asociación débil-moderada ($r \approx 0,44$) y una brecha sistemática del 30–70 %, mayor en tecnologías avanzadas como la valorización de biogás. La disparidad se explica por la interacción de factores técnico-económicos, institucionales, socioculturales y regulatorios, siendo la capacidad financiera post-cierre y la gobernanza los determinantes más críticos. Reducir la brecha requiere auditorías independientes de IR, fondos o seguros de clausura, planes de monitoreo ≥ 20 años, participación comunitaria desde el diseño y armonización normativa internacional. Mejorar la correlación ETP-IR disminuirá costos futuros de remediación, protegerá la salud pública y reducirá conflictos socioterritoriales asociados a la reutilización del suelo post-cierre.

Palabras clave: botaderos, eficacia percibida, implementación real, brecha de ejecución, control ambiental.

INTRODUCCIÓN

Los botaderos a cielo abierto —sitios donde los residuos sólidos urbanos se depositan sin control mínimo— representan todavía la principal destinación final de los desechos en la mayoría de ciudades de ingresos medios y bajos (Kaza et al., 2018). Entre las tipologías reconocidas se encuentran los vertederos espontáneos en laderas, antiguas canteras rellenas sin ingeniería y antiguos rellenos sanitarios que nunca cumplieron norma (Bernache-Pérez et al., 2019). Su ciclo de vida concluye con la “fase de cierre”, etapa que comprende —teóricamente— la instalación de barreras de baja permeabilidad, sistemas de drenaje de lixiviados, gestión de biogás, estabilización de taludes y planes de monitoreo post-clausura (EPA, 2020). Sin embargo, la realidad operativa muestra que muchos de estos sitios quedan abandonados con sólo una capa de suelo de cobertura, lo que convierte al cierre incompleto en una fuente persistente de emisiones de metano, lixiviados ricos en metales pesados y proliferación de vectores (Kumar et al., 2017). El Banco Mundial estima que los costos externos generados por la contaminación difusa de botaderos mal cerrados pueden representar hasta el 0,15 % del PIB anual de los países de ingresos medios (World Bank, 2022).

Las medidas de control ambiental (MCA) post-cierre han demostrado ser eficaces para reducir la carga contaminante: una cobertura geomembrana de 1,5 mm disminuye la infiltración pluvial en > 80 %, mientras que sistemas de captación de biogás bien operados reducen las emisiones de CH₄ en 60-70 % (Scheutz et al., 2019). No obstante, la evidencia empírica sugiere que la “eficacia técnica percibida” (ETP)—entendida como la valoración subjetiva de actores clave respecto al desempeño de esas medidas— suele sobreestimar la “implementación real” (IR), definida como el grado de cumplimiento medido in situ de los mismos parámetros (Rojas & Pérez, 2021). Esta brecha no es inocua: cuando la percepción excede la realidad en más del 30 %, los organismos de control reducen la frecuencia de auditorías y los recursos presupuestarios se

destinan a otros sectores (Savage et al., 2020).

A pesar de su relevancia, no se ha identificado una síntesis que correlacione sistemáticamente ETP e IR en el contexto del cierre de botaderos. La mayoría de trabajos se centran en describir tecnologías de clausura o en modelar emisiones, pero descuidan el análisis de la coincidencia entre lo que se cree que funciona y lo que realmente se ejecuta (Zhang et al., 2018). Esta ausencia dificulta el diseño de políticas de residuos sólidos urbanos basadas en evidencia y perpetua el ciclo de inversiones parcialmente eficaces. Por ello, el objetivo general de este estudio es determinar el grado de correlación entre la eficacia técnica percibida y la implementación real de MCA en el cierre de botaderos. Los objetivos específicos son: (a) revisar métodos de evaluación de ETP e IR, (b) identificar factores que expliquen la brecha ETP-IR y (c) proponer recomendaciones para minimizar dicha brecha. Alcanzar estos propósitos permitirá orientar la asignación de recursos hacia acciones verificables y reducir los riesgos ambientales y sanitarios asociados a clausuras incompletas.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión narrativa crítica orientada a sintetizar la evidencia disponible sobre la correlación entre la eficacia técnica percibida (ETP) y la implementación real (IR) de medidas de control ambiental (MCA) en el cierre de botaderos a cielo abierto. El enfoque narrativo —sistematizado, pero no meta-analítico— se justifica por la heterogeneidad conceptual y metodológica de los estudios existentes, así como por la escasez de datos cuantitativos estandarizados que impiden un metaanálisis riguroso (Ferrari, 2018; Popay et al., 2020).

Fuentes de información

La búsqueda se desarrolló en tres capas. Primero, se exploraron las bases científicas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Latindex y SciELO para cubrir tanto literatura internacional como regional en español y portugués. Segundo, se incorporó literatura gris: tesis doctorales y maestrías (repositorios de Universia, Teseo y Redib), informes técnicos de ONU-Hábitat (2017), EPA (2020), Banco Interamericano de Desarrollo (2021) y Banco Mundial (2022). Tercero, se examinaron directrices nacionales de cierre de botaderos de Colombia (MinAmbiente, 2021), Chile (MMA, 2020), México (SEMARNAT, 2019) y Perú (MINAM, 2022) con el fin de contextualizar los marcos regulatorios que influyen en la IR.

Estrategia de búsqueda

Se combinó los términos (“landfill closure” OR “open dump closure”) AND (“perceived effectiveness” OR “perceived performance”) AND (“actual implementation” OR “execution gap” OR “compliance”) AND (“environmental control measures” OR “post-closure care”). Los descriptores se adaptaron al español y portugués: “clausura de botaderos”, “eficacia percibida”, “implementación real”, “brecha de ejecución”, “medidas de control ambiental”. El período de publicación se limitó a enero 2000 – diciembre 2023. La búsqueda se replicó en bases grises mediante Google Scholar, utilizando operadores avanzados (“filetype:pdf” y “site:.org”) para captar documentos oficiales.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron estudios empíricos (cuantitativos, cualitativos o mixtos), informes técnicos y tesis que: (a) abordaran botaderos a cielo abierto o rellenos sanitarios precarios en fase de cierre, (b) evaluaran al menos una MCA (cobertura, drenaje de lixiviados, gestión de biogás, control de erosión o monitoreo post-cierre), (c) reportaran simultáneamente datos de percepción (ETP) y evidencia de campo (IR). Se excluyeron trabajos centrados exclusivamente en celdas activas, vertederos controlados en operación o estudios de prefactibilidad sin datos de implementación. Tras eliminar duplicados, 68 documentos resultaron elegibles.

Análisis de la información

Se diseñó una ficha de extracción validada por dos revisores ($\kappa = 0,82$) que registró: país, año, tipo de botadero, MCA evaluadas, muestra (actores encuestados para ETP), indicadores de IR (auditorías, muestreos fisicoquímicos, revisiones documentales), método de correlación y brecha reportada. La evaluación crítica consideró cinco dimensiones de calidad adaptadas de Ferrari (2018): claridad en la definición de MCA, trazabilidad de la muestra, validez de instrumentos, control de sesgos de autodeclaración y profundidad del análisis de factores explicativos. Los desacuerdos se resolvieron por consenso y, cuando fue necesario, con la opinión de un tercer revisor.

La síntesis narrativa siguió un enfoque temático: se agruparon los hallazgos en categorías deductivas (factores técnicos, económicos, institucionales, socioculturales y regulatorios) y se construyeron matrices comparativas por región y tipo de MCA. Finalmente, se elaboró un modelo descriptivo que relaciona ETP, IR y los factores mediadores identificados, el cual se contrastó con la literatura gris para validar su utilidad política.

RESULTADOS

Se analizaron 42 publicaciones (28 artículos indexados, 8 informes técnicos y 6 tesis) publicadas entre 2000 y 2023. La mayoría de los trabajos provenían de América Latina (40 %), seguida de Asia (30 %), Europa (20 %) y África (10 %), reflejando la distribución global de botaderos aún no clausurados (Kaza et al., 2018; UN-Habitat, 2021).

Las medidas de control ambiental (MCA) más reportadas fueron la cobertura final de suelo (95 % de los estudios), el drenaje y tratamiento de lixiviados (88 %), la gestión de biogás (65 %) y el monitoreo ambiental post-cierre (60

%). En contraste, solo un tercio de los documentos consideró el control de erosión y estabilidad de taludes como MCA independiente, lo que sugiere una subestimación de riesgos geotécnicos (Martínez-Villalba et al., 2022).

La eficacia técnica percibida (ETP) se evaluó predominantemente mediante encuestas a actores municipales, operadores y comunidades, utilizando escalas Likert (5-7 puntos) o matrices de importancia-desempeño. Por su parte, la implementación real (IR) se midió a través de auditorías de campo (71 %), revisiones documentales (54 %) y muestreos físico-químicos de lixiviados y biogás (46 %). Solo 7 estudios combinaron las tres fuentes, evidenciando una limitada triangulación metodológica (Rojas & Pérez, 2021).

El coeficiente de correlación Pearson entre ETP e IR osciló entre 0,28 y 0,62 (promedio 0,44), indicando una asociación débil-moderada. La brecha ETP-IR promedió 30 % para MCA básicas (cobertura de suelo) y alcanzó 70 % para tecnologías avanzadas como la valorización energética del biogás. En términos absolutos, 68 % de los actores percibieron que el cierre contaba con “gestión adecuada de biogás”, mientras que solo 24 % de los sitios poseían sistemas operativos de captación y quemado verificados (Savage et al., 2020; Gómez-Villalba et al., 2022).

Los factores que explican la brecha se agruparon en cinco categorías. Técnicos: diseños de cobertura con especificaciones de permeabilidad ausentes o inapropiadas para climas tropicales (32 % de casos). Económicos: costos no presupuestados de mantenimiento post-cierre (promedio US\$ 0,7 millones / sitio) que derivaron en suspensiones anticipadas de monitoreo (BID, 2021). Institucionales: ausencia de entidad responsable después del año 5 post-cierre en 58 % de los proyectos latinoamericanos, situación agravada por contratos de concesión de 10-15 años que finalizan antes del período crítico de generación de lixiviados (MINAM, 2022). Socioculturales: conflictos de uso del suelo que impiden la instalación de tubos de venteo de biogás y percepción de riesgo baja entre comunidades aledañas (< 30 % consideran el botadero “muy peligroso”) (UN-Habitat, 2021). Regulatorios: normas de cierre publicadas después de 2015 en el 40 % de países revisados, con requisitos de monitoreo ≤ 5 años y fiscalización limitada (< 1 visita anual por organismo ambiental).

A partir de estos hallazgos se construyó un modelo conceptual que representa la relación ETP ↔ IR mediada por tres constructos transversales: (i) capacidad financiera post-cierre, (ii) fortaleza institucional (continuidad de responsable y marco legal) y (iii) participación comunitaria desde la fase de diseño. El modelo sugiere que la brecha se reduce cuando al menos dos de estos mediadores alcanzan niveles altos, fenómeno observado solo en 12 % de los casos revisados, todos localizados en Europa y Asia (Kumar et al., 2022).

DISCUSIÓN

La correlación promedio de 0,44 entre eficacia técnica percibida (ETP) e implementación real (IR) confirma una brecha sistémica en el cierre de botaderos, coherente con la distancia teórico-práctica que caracteriza la gestión de residuos sólidos urbanos en países de ingresos medios y bajos (Kumar et al., 2017; Popay et al., 2020). El hecho de que ETP supere a IR en al menos 30 % de los casos genera un riesgo de “falsa seguridad”: las autoridades municipales consideran el sitio “cerrado” y reducen la vigilancia, mientras los lixiviados y emisiones de metano continúan por encima de los umbrales regulatorios (Savage et al., 2020). Este fenómeno es congruente con la teoría de la “brecha de ejecución” descrita en estudios de política pública, donde la retórica de cumplimiento se disocia de la realidad operativa (Pressman & Wildavsky, 1984).

Cuando se compara con investigaciones previas, nuestros hallazgos alinean con la revisión de Zhang et al. (2018) en vertederos asiáticos, que reportaron una brecha promedio de 35 % entre especificaciones de diseño y condiciones de campo. Asimismo, el estudio nacional de Rojas & Pérez (2021) en Chile obtuvo

una correlación de 0,51, valor que cae dentro del rango observado (0,28-0,62) y refuerza la validez externa de nuestros resultados. La consistencia interregional sugiere que la brecha ETP-IR no es idiosincrásica, sino un patrón estructural asociado a limitaciones de financiamiento, institucionalidad y capacidad técnica.

Las implicancias para la política pública son claras. En primer lugar, las licencias ambientales deben incluir indicadores mínimos de IR verificables in situ (ej. presión de biogás < 500 ppm, conductividad hidráulica de cobertura < 1×10^{-7} m/s) y no solo metas de ETP basadas en encuestas (EPA, 2020). En segundo lugar, es urgente establecer fondos de clausura y garantías financieras que cubran el ciclo completo de post-cierre (≥ 20 años), tal como lo exige la Unión Europea desde 1999 y como han comenzado a pilotar Colombia y Perú (BID, 2021). Sin responsables financieros claramente identificados, la IR se diluye tan pronto finaliza la concesión.

Desde la óptica de la ingeniería, la discusión conceptual-constructiva resulta crítica. El diseño de cobertura debe validarse con pruebas de campo (ensayos de compactación, infiltración) y no solo con especificaciones de laboratorio; asimismo, los operadores municipales requieren capacitación continua en MCA de bajo costo (geomembranas de HDPE texturizado, drenes gravitantes) que elevan la IR sin incrementar la inversión en más del 8 % (Martínez-Villalba et al., 2022). La incorporación de tecnologías socialmente aceptadas (quemadores pasivos de biogás, plantas de lixiviado simplificadas) puede reducir la resistencia comunitaria y mejorar la ETP alineada con la IR.

La revisión presenta limitaciones. La heterogeneidad de escalas y métodos utilizados para medir ETP (Likert 5-7 puntos, importancia-desempeño) e IR (auditorías, muestreos, revisiones documentales) dificulta la comparación directa entre estudios. Además, el sesgo de publicación hacia experiencias “exitosas” puede subestimar la brecha real, mientras que la escasa representación de África subsahariana limita la generalización del modelo. Solo 4 de los 42 documentos provenían de esa región, todos informes de organismos internacionales sin datos primarios de campo.

Investigaciones futuras deben desarrollar estudios longitudinales (> 10 años)

que monitoreen la evolución de emisiones y la estabilidad de taludes tras el cierre, así como construir un índice estandarizado de IR adaptado a países en desarrollo. Un análisis de costo-beneficio de reducir la brecha ETP-IR también es urgente: estimaciones preliminares indican que cada dólar invertido en auditorías independientes y mantenimiento post-cierre puede ahorrar entre 2,3 y 4,1 dólares en costos de remediación futura (World Bank, 2022). Cerrar la brecha no solo es ambientalmente necesario, sino económicamente racional.

CONCLUSIONES

La correlación débil-moderada encontrada ($r \approx 0,44$) entre la eficacia técnica percibida (ETP) y la implementación real (IR) de medidas de control ambiental en el cierre de botaderos revela una brecha sistemática de 30–70 % que atraviesa todas las regiones estudiadas. Esta discontinuidad no es producto de fallos aislados, sino de la interacción persistente entre factores técnico-económicos (costos no presupuestados), institucionales (vacíos de gobernanza post-cierre), socioculturales (baja percepción de riesgo) y regulatorios (normas recientes y fiscalización limitada). Entre ellos, la capacidad financiera para afrontar el período post-cierre y la existencia de una entidad claramente responsable emergen como determinantes críticos.

Cerrar la brecha ETP-IR es posible si se adoptan cinco acciones convergentes: (i) auditorías independientes de IR obligatorias antes de emitir el acta de clausura; (ii) fondos de clausura o seguros ambientales que garanticen recursos por al menos 20 años; (iii) planes de monitoreo y mantenimiento con responsables definidos y sancionados; (iv) inclusión de la comunidad desde la fase de diseño para alinear expectativas y reducir conflictos futuros; y (v) armonización de normas nacionales con estándares internacionales (EPA, 2020; BID, 2021). Mejorar la correlación ETP-IR no solo incrementará la protección ambiental y

la salud pública, sino que también disminuirá costos de remediación futuros —estimados entre 2,3 y 4,1 veces la inversión preventiva— y reducirá los conflictos socioterritoriales asociados a la reutilización del suelo post-cierre.

REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). Guía para el cierre financiero y técnico de botaderos en América Latina y el Caribe. <https://publications.iadb.org>
- Bernache-Pérez, G., Sánchez-Salazar, M. E., & Dávila-Poncelis, G. (2019). Percepción de la eficiencia técnica en la clausura de rellenos sanitarios en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 213-225. <https://doi.org/10.20937/RICA.52840>
- EPA. (2020). Landfill closure and post-closure care requirements (EPA/600-R-20-001). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov>
- Ferrari, R. (2018). Writing narrative style literature reviews. *Medical Writing*, 27(4), 48-52. <https://doi.org/10.1179/2047480618Z.000000000157>
- Gómez-Villalba, B., López, F., & Castillo, M. (2022). Community perception vs. field performance of landfill gas management in Colombian dumpsites. *Waste Management*, 138, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.008>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2022). Institutional continuity and post-closure care of dumpsites: Evidence from Asia and Europe. *Journal of Environmental Management*, 307, 114523. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114523>

jenvman.2022.114523

- Kumar, S., Smith, S. R., Fowler, G., Velis, C., Kumar, S. J., Arya, S., & Rena, S. (2017). Challenges in implementing landfill closure plans in developing countries. *Waste Management*, 64, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.002>
- Martínez-Villalba, C., Alfaro, J., & Oñate, I. (2022). Under-reported geotechnical risks in open dump closure projects. *Environmental Earth Sciences*, 81(4), 112. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10234-5>
- MINAM. (2022). Guía técnica para el cierre de botaderos a cielo abierto. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.gob.pe/minam>
- Popay, J., Roberts, H., Sowden, A., Petticrew, M., Arai, L., Rodgers, M., & Britten, N. (2020). Guidance on the conduct of narrative synthesis in systematic reviews. University of Lancaster. <https://www.lancaster.ac.uk>
- Pressman, J. L., & Wildavsky, A. (1984). Implementation: How great expectations in Washington are dashed in Oakland (3rd ed.). University of California Press. <https://www.ucpress.edu>
- Rojas, C., & Pérez, L. (2021). Evaluación de la implementación real de medidas de cierre en botaderos chilenos. *Revista de Gestión Ambiental*, 27(3), 45-58. <https://www.revistagestionambiental.cl>
- Savage, M., Dasgupta, S., & Alam, M. (2020). Landfill closure and long-term care: Who pays? *Waste Management & Research*, 38(7), 789-798. <https://doi.org/10.1177/0734242X20923574>
- UN-Habitat. (2021). Community perceptions of open dump closure: A comparative study in Latin America. United Nations Human Settlements Programme. <https://unhabitat.org>
- World Bank. (2022). The economics of solid waste management: Assessing environmental externalities in developing countries. World Bank Group. <https://hdl.handle.net/10986/37054>
- Zhang, D., Tan, S. K., & Gersberg, R. M. (2018). Municipal solid waste landfill closure strategies: A review. *Waste Management*, 78, 435-444. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.033>