

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE ECONOMÍA**

**Trabajo de Integración Curricular previo a la
obtención del título de Economista**

Artículo Académico

Una aproximación descriptiva de los costos de la gestión
integral de desechos sólidos en las provincias del Ecuador,
Periodo 2017-2020, utilizando Machine Learning.

Josselyn Andrea Sánchez Jumbo

jsanchez003@puce.edu.ec

Director: Mateo Villalba Andrade

mpvillalba@puce.edu.ec

Quito, febrero de 2025

Resumen

El objetivo de este estudio es realizar un análisis descriptivo de los costos por tonelada de la Gestión Integral de Desechos Sólidos en las provincias del Ecuador (GIDS), durante el período 2017-2020. Para ello, se empleó estadística descriptiva y se aplicaron técnicas de *clustering*, como K-Means y DBSCAN, las cuales segmentan las provincias en grupos según sus niveles de costos unitarios de la GIDS y de variables como la densidad poblacional y el valor agregado bruto per cápita en la provisión de servicios de agua y electricidad. Estas herramientas permitieron identificar patrones en los costos unitarios de las siguientes tecnologías de disposición final: rellenos sanitarios, celdas emergentes y botaderos. Los resultados muestran que los rellenos sanitarios son la opción más costo-eficiente y la de menor volatilidad en los costos, al presentar una gran capacidad para reducir costos unitarios mediante economías de escala, mientras que las celdas emergentes y botaderos presentan costos de tendencia creciente en el tiempo y en relación con el volumen de residuos. También se halló que el desarrollo de capacidades e infraestructura para la provisión de servicios de agua y electricidad está asociado con un mejor aprovechamiento de economías de escala y tiene un efecto sinérgico con la GIDS que permite reducir aún más los costos unitarios. Provincias con alta densidad poblacional podrían optimizar recursos de mejor manera al aprovechar economías de escala, provincias de densidad poblacional intermedia podrían beneficiarse de invertir en desarrollar capacidades e infraestructura ya que esto redundaría en una reducción de sus costos por tonelada en la GIDS. Finalmente, provincias con características atípicas como su gran distancia o aislamiento geográfico de los grandes centros poblados y sus dificultades logísticas deberían explorar alternativas innovadoras más adecuadas a su propio medio. Este análisis destaca la necesidad de adaptar políticas públicas y tecnologías de gestión a las particularidades específicas de cada provincia, promoviendo la sostenibilidad y eficiencia operativa en la GIDS.

Palabras Claves: Gestión integral de desechos sólidos, rellenos sanitarios, celdas emergentes, botaderos, economías de escala, *machine learning*, métodos no supervisados, *clustering*.

Abstract

The objective of this study is to carry out a descriptive analysis of the costs per ton of Integrated Solid Waste Management (ISWM) in the provinces of Ecuador, during the period 2017-2020. To do so, descriptive statistics were used and clustering techniques, such as K-Means and DBSCAN, were applied, which segment the provinces into groups according to their levels of ISWM unit costs and variables such as population density and gross added value per capita in the provision of water and electricity services. These tools allowed identifying patterns in the unit costs of the following final disposal technologies: sanitary landfills, emergency cells and dumps. The results show that sanitary landfills are the most cost-efficient option and the one with the lowest cost volatility, as they have a great capacity to reduce unit costs through economies of scale, while emergency cells and dumps have costs that tend to increase over time and in relation to the volume of waste. It was also found that the development of capacities and infrastructure for the provision of water and electricity services is associated with a better use of economies of scale and has a synergistic effect with the GIDS that allows for further reductions in unit costs. Provinces with high population density could better optimize resources by taking advantage of economies of scale, provinces with intermediate population density could benefit from investing in developing capacities and infrastructure since this would result in a reduction of their costs per ton in the GIDS. Finally, provinces with atypical characteristics such as their great distance or geographic isolation from large population centers and their logistical difficulties should explore innovative alternatives more suited to their own environment. This analysis highlights the need to adapt public policies and management technologies to the specific characteristics of each province, promoting sustainability and operational efficiency in the GIDS.

Keywords: *Integrated solid waste management, landfills, emergent cells, dumps, economies of scale, machine learning, unsupervised methods, clustering.*

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| Resumen..... | 2 |
| Introducción | 1 |
| Marco Teórico | 3 |
| Ciclo Integral en la GIDS..... | 3 |
| Análisis Económico de los Costos en la GIDS | 4 |
| Desafíos Globales en la Gestión de Residuos Sólidos | 4 |
| Impactos Ambientales y Sociales de una Gestión Inadecuada de Residuos | 5 |
| GIDS como Pilar del Desarrollo Sostenible..... | 5 |
| Evolución de la GIDS, según el Nivel de Ingresos..... | 5 |
| Costos Totales en la GIDS en Ecuador..... | 6 |
| Economías de escala aplicadas a la GIDS | 6 |
| Marco Metodológico | 7 |
| Modelos Multicriterio en la GIDS..... | 7 |
| Estudios correlacionales no-experimentales..... | 8 |
| Evolución y Distribución de Costos en la GIDS en Ecuador | 8 |
| Propuesta metodológica | 9 |
| Resultados y discusión | 14 |
| Conclusiones y Recomendaciones | 29 |
| Bibliografía | 31 |
| Anexos..... | 34 |

Introducción

El aumento de la población, la urbanización y el progreso económico han incrementado el volumen de generación de desechos sólidos, desde hace varias décadas atrás. Esta realidad ha incrementado las dificultades que enfrenta la Gestión Integral de Desechos Sólidos (GIDS) en Ecuador. Los factores mencionados ponen a prueba la capacidad de los gobiernos locales para gestionar eficazmente los sistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los desechos (Ministerio del Ambiente, 2023). Para el periodo comprendido entre 2017 y 2020, se evidencia un aumento considerable en el gasto público destinado a la GIDS, pero la dinámica de dicho gasto y de sus respectivos costos unitarios no han sido homogéneos en todo el país, pues varía significativamente entre las diferentes provincias.

Las diferencias en los costos unitarios de la GIDS entre provincias pueden atribuirse a una serie de factores, geográficos y socioeconómicos, como: la densidad poblacional, el nivel de industrialización, la infraestructura disponible y la capacidad administrativa y financiera de los gobiernos locales. En este sentido, es necesario comprender con mayor profundidad las condiciones que determinan las diferencias de estos costos unitarios entre provincias. Por lo expuesto, surge la oportunidad de aplicar nuevas herramientas para analizar estas diferencias. Las técnicas de *Machine Learning* (ML) son una alternativa que permite identificar patrones en los datos que aportan para estudiar la realidad de las provincias respecto a la GIDS, esto ayuda a la comprensión de los entornos provinciales, y al mismo tiempo contribuye con elementos valiosos para la creación de políticas públicas adecuadas a las necesidades de cada provincia. Sobre la base de las aplicaciones del ML que describe James *et al.* (2023), se puede colegir que el uso de ML para el análisis de los costos unitarios de la GIDS puede ayudar a una mejor comprensión de los elementos que influyen en dichos costos, y aportar así con criterios para la optimización de recursos que permitan aumentar la eficiencia operativa e innovar a favor de una gestión más sostenible.

En este sentido, la aplicación de ML en la GIDS puede ayudar a identificar factores que inciden en los costos y que al abórdalos podrían aportar a optimizar recursos. Además, los desafíos que cada provincia enfrenta en Ecuador pueden ser muy diferentes, dada la diversidad geográfica que conlleva una extensión de 256 370 km² y su ubicación en la línea ecuatorial, con grandes diferencias de cuota de altura y una composición de cuatro regiones principales: costa, sierra, amazonia e insular. Por lo tanto, cada una de estas regiones y sus provincias, enfrentan varios desafíos particulares en la GIDS, es por esto que las soluciones deben ser adecuadas a cada una de las condiciones geográficas, económicas y sociales específicas de cada territorio. Lo anterior puede ayudar a construir políticas adecuadas al medio de cada unidad territorial, al considerar las necesidades particulares de cada provincia.

En el Ecuador se utilizan tres tecnologías principales en la GIDS para la disposición final de los residuos: rellenos sanitarios, celdas emergentes y botaderos. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2022).

El relleno sanitario presenta la manera más segura y controlada, ya que este método está diseñado para la mitigación de impactos ambientales, sanitarios y sociales según (Ministerio del Ambiente, 2023) . Los rellenos sanitarios consisten en compactar los residuos sólidos en capas, cubriéndolos con materiales como tierra para minimizar su exposición al aire, controlar olores y evitar la proliferación de plagas y es de esta forma que los rellenos sanitarios modernos van incorporando sistemas o técnicas para el drenaje de lixiviados como también la captura de gases, los cuales logran ser procesados para disminuir el impacto ambiental en el mundo (Global Methane Initiative, 2010).

Las celdas emergentes son estructuras temporales utilizadas en situaciones de emergencia o hasta que se implementen soluciones permanentes como los rellenos sanitarios. Aunque presentan algunas medidas de control ambiental, su capacidad es limitada y no cuentan con el nivel de protección y tecnología avanzada de los rellenos sanitarios, por lo que solo ofrecen una solución provisional y de inferior calidad en la GIDS.

Los botaderos son sitios de disposición de desechos sin ningún tipo de infraestructura o control técnico, donde los residuos se depositan de manera indiscriminada, generando serios problemas ambientales y de salud pública (Banco Mundial, 2018). Aunque este último tipo de disposición final es totalmente inadecuado y no se recomienda, en la realidad de las provincias del Ecuador es una práctica presente.

La GIDS en las provincias ecuatorianas está bajo la supervisión del (Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2017), que establece las normativas y supervisa el cumplimiento de las políticas nacionales de manejo de residuos. Sin embargo, la competencia de la GIDS es de los gobiernos cantonales. En este sentido, la Constitución de la República del Ecuador, en el artículo 264, numeral 4, señala:

“Los gobiernos municipales tendrán las siguientes competencias exclusivas sin perjuicios de otras que determina la ley: ... (4) Prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, actividades de saneamiento ambiental y aquellos que establezca la ley.” (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Además, el Código Orgánico del Ambiente, en el artículo 27, numerales 6 y 7 establece:

“Facultades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Metropolitanos y Municipales en materia ambiental. En el marco de sus competencias ambientales exclusivas y concurrentes corresponde a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Metropolitanos y Municipales el ejercicio de las siguientes facultades, en concordancia con las políticas y normas emitidas por los Gobiernos Autónomos Provinciales y la Autoridad Ambiental Nacional:...(6) Elaborar planes, programas y proyectos para los sistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos o desechos sólidos; (7) Generar normas y procedimientos para la gestión integral de los residuos y desechos para prevenirlos, aprovecharlos o eliminarlos, según corresponda (Ministerio del Ambiente, 2023)”.

Por lo tanto, en Ecuador los responsables de la GIDS son los gobiernos cantonales. Sin embargo, estos gobiernos enfrentan diferentes contextos geográficos, socioeconómicos y no poseen las mismas capacidades, lo que genera discrepancias importantes en los costos de la disposición final anual de los desechos sólidos (Ministerio del Ambiente, 2023). La información disponible sobre el tema está agregada a nivel provincial y esta disparidad en la realidad de los cantones también se refleja agrupada en los datos provinciales. En este contexto, las provincias del país utilizan las tres formas descritas anteriormente de disposición final: relleno sanitario, celdas emergentes y botaderos INEC (2022). La participación en la GIDS de cada una de estas alternativas varía en cada provincia, llegando incluso a casos en los que los rellenos sanitarios, que son considerados la opción más adecuada, no se practica. En consecuencia, existen varias áreas que dependen de los botaderos y celdas emergentes, que presentan mayores riesgos ambientales y de salud pública, así como diferentes desempeños en sus costos unitarios.

Según el INEC (2019), los costos operativos para la gestión de residuos varían significativamente entre regiones: la Sierra registra un promedio de 57,79 dólares por tonelada, la Costa 48,98 dólares por tonelada, la Amazonía 110,48 dólares por tonelada y la región Insular, al ser una zona protegida y remota, tiene el costo más alto de 163,16 dólares por tonelada. Estas disparidades en los costos y métodos de disposición de residuos

evidencian la importancia de analizar la heterogeneidad de las unidades territoriales del Ecuador en relación con la GIDS. Para ello, se pueden emplear herramientas analíticas que faciliten la identificación y comprensión de elementos clave, como las características demográficas, la disponibilidad de infraestructura y la capacidad de provisión de servicios esenciales (como el agua potable y la electricidad), y estudiar cómo se relacionan con la estructura de costos unitarios de la GIDS. Al asociar estos elementos clave con las diversas estructuras de costos unitarios en las provincias, se puede aportar con elementos que permitan una comprensión más precisa de la GIDS en las provincias y así aportar elemento que permitan optimizar la asignación de recursos.

El presente estudio contiene una aproximación descriptiva de los costos unitarios de la GIDS en las provincias del Ecuador durante el periodo examinado 2017-2020, utilizando estadística descriptiva y técnicas de ML. De esta manera, se trata de identificar factores que explican las diferencias de costos unitarios entre las provincias ecuatorianas, y así comprender mejor las prácticas de la GIDS en las diferentes provincias y aportar con elementos que ayuden a optimizar la GIDS. En este sentido, el desarrollo de modelos de aglomeración (*clustering*) utilizando técnicas de ML puede aportar para una mejor comprensión de factores asociados a la estructura de costos en las provincias y facilitar así la toma de decisiones en la GIDS, al identificar oportunidades de aprendizaje asociadas a buenas prácticas según las características de cada provincia y el desempeño de sus costos unitarios.

En este sentido, el presente estudio aborda la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál ha sido la composición y las características del costo de la GIDS en las provincias del Ecuador durante el periodo 2017-2020? Para responder a esta pregunta, se propone el objetivo de describir, analizar y comparar los costos unitarios a la GIDS en las distintas provincias del país. El objetivo se cumple mediante la aplicación de estadística descriptiva y un método no supervisado de ML, con dos algoritmos de aglomeración (*clustering*). Estas técnicas permiten identificar tendencias y patrones de los costos de la GIDS en la realidad geográfica, económica y social de las distintas provincias, para comprender mejor cómo podemos mejorar la estructura y el desempeño de los costos unitarios de la GIDS en Ecuador.

Marco Teórico

La GIDS, al ser un enfoque integral, abarca todas las fases de la gestión de residuos, que van desde la generación de desechos hasta la disposición final de los mismos. Este enfoque integral tiene por objetivo minimizar los impactos ambientales, sociales y económicos, negativos, que generan los desechos. Este sistema incluye la reducción en origen, el reciclaje, la reutilización y el tratamiento adecuado de los residuos no recuperables, contribuyendo a la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático (Ministerio del Ambiente, 2023). Sin embargo, el crecimiento de los residuos, impulsado por el desarrollo económico y demográfico, representa un desafío global que requiere sistemas de gestión adaptables y sostenibles. La GIDS implica costos operativos y de transportes considerables que se modifican y reforman de acuerdo con las circunstancias, escenarios ambientales, geográficas y socioeconómicas de las provincias y que, en Ecuador, establecen un desafío considerable para los gobiernos locales.

Ciclo Integral en la GIDS

Las etapas del ciclo de la GIDS son: la generación, la recolección, el tratamiento y la disposición final. En otras palabras, esta gestión va más allá de la recolección de basura y debe incorporar estrategias para la minimización de residuos en la fuente como la clasificación, el reciclaje, la reutilización, la recuperación de materiales y la disposición adecuada de desechos no valorizables (Subhasish , y otros, 2019). Estos elementos permiten una

planificación que asegura que los recursos sean asignados de manera más eficientes y que las decisiones operativas guarden concordancia con los principios de sostenibilidad.

El punto de partida de la GIDS consiste en reducir el volumen de desechos destinados a vertederos y rellenos sanitarios, disminuyendo la presión sobre estas infraestructuras y extendiendo su vida útil. Adicionalmente, la GIDS contribuye a mitigar los perjudiciales impactos ambientales asociados con la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación del suelo y los cuerpos de agua (Hoornweg & Bhada, 2012). La valorización de materiales mediante el reciclaje y la reutilización no solo propone un uso más moderado de los recursos, sino que también aporta a generar innovación y a implementar procesos de economía circular, en los cuales los desechos se convierten en insumos para nuevos ciclos productivos (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Estas acciones generan beneficios multidimensionales: ambientales, al reducir la contaminación y conservar los recursos naturales; económicos, al disminuir los costos operativos y generar ingresos mediante la comercialización de materiales recuperados; y sociales, al crear empleos verdes y mejorar la calidad de vida en las comunidades (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016).

Análisis Económico de los Costos en la GIDS

El manejo integral de desechos sólidos, desde una perspectiva económica, conlleva diversos costos en cada etapa del proceso, que incluyen la generación, separación, tratamiento, compostaje y disposición final de los residuos. Además, el impacto financiero de estos movimientos se divide en dos categorías fundamentales: costos operativos y de transporte (Rondón, Szantó, Pacheco, Contreras, & Gálvez, 2016).

Los costos operativos incluyen: el mantenimiento de las infraestructuras, la gestión de residuos en las instalaciones y la remuneración de personal, entre otros rubros. Los costos de transporte se componen de: el mantenimiento de la flota de vehículos, el consumo de combustible y neumáticos, entre otros rubros que implican el traslado de desechos desde el punto de recolección hasta los centros de tratamiento o disposición final. Ambos componentes de los costos operativos deben ser considerados para optimizar la GIDS y garantizar su sostenibilidad financiera en el largo plazo.

Desafíos Globales en la Gestión de Residuos Sólidos

El aumento acelerado de la generación de residuos sólidos es provocado por el crecimiento poblacional y el desarrollo económico. De acuerdo con las proyecciones del Banco Mundial (2018), la cantidad de desechos que alcanzó 2.01 mil millones de toneladas en el año 2016 podría alcanzar los 3.40 mil millones de toneladas para el año 2050. Este considerable aumento revela la importancia de establecer sistemas de gestión de residuos sostenibles que estén diseñados para responder de forma eficiente a las crecientes demandas de tratamiento y de disposición final.

En este sentido, el principal desafío de la GIDS es buscar estrategias de gestión que le permitan enfrentar el crecimiento demográfico y económico. De esta manera, se procura minimizar el impacto ambiental y sanitario de la creciente gestión de residuos, y evitar los problemas que acarrea el exceso de contaminación que ocurre en los vertederos y puntos de disposición final que afectan el suelo, el agua y el aire. Los efectos negativos de una gestión inadecuada podrían ocasionar graves problemas ambientales y de salud pública. De aquí se puede concluir la importancia de fortalecer la GIDS de manera que pueda enfrentar exitosamente la creciente demanda (Banco Mundial, 2018; Naciones Unidas, 2018).

Impactos Ambientales y Sociales de una Gestión Inadecuada de Residuos

La GIDS resulta de trascendental importancia para mitigar y prevenir impactos negativos tanto en el medio ambiente como en la salud pública (Bernache Pérez, 2015). Una gestión inadecuada de los residuos genera daños ambientales que contaminan el aire, el agua y el suelo y esto incrementa la incidencia de enfermedades en la población en los ambientes contaminados. Por lo tanto, las comunidades vecinas del sitio de disposición final son altamente vulnerables a las consecuencias de una gestión inadecuada, ya que están más expuestas a los efectos adversos de un manejo ineficiente de los desechos.

Según Naciones Unidas (2018), en países en vías de desarrollo y en zona densamente pobladas una gestión inadecuada de desechos sólidos no solo contribuye a la degradación de los ecosistemas, sino también amplía las desigualdades sociales, profundizando la pobreza, la indigencia, y la falta de oportunidades. En estas regiones, las brechas sociales y económicas pueden ser exacerbadas aumentando la vulnerabilidad de la población. En este contexto, la importancia de la GIDS trasciende los aspectos medio ambientales y de salud pública y se convierte en un componente importante que aporta al desarrollo social y a las oportunidades económicas. Por lo tanto, para construir una sociedad más justa y equitativa la GIDS se convierte en un componente ineludible para mejorar la calidad de vida y el bienestar de las poblaciones más pobres y vulnerables, especialmente en las zonas marginadas que guardan vecindad con los sitios de disposición final (Naciones Unidas, 2018).

GIDS como Pilar del Desarrollo Sostenible

Para lograr el desarrollo sostenible la GIDS debe trascender los aspectos ambientales y de salud pública, y convertirse en una intervención integral que brinde oportunidades para el desarrollo económico y el mejoramiento de las condiciones sociales (Bernache Pérez, 2015). Es decir, el enfoque integral abarca y armoniza factores económicos, sociales y ambientales, resaltando a la GIDS como un elemento necesario para el desarrollo sostenible, que va más allá de los aspectos técnicos, y aporta a la conservación del equilibrio ecológico y el bienestar de las comunidades.

Las GIDS aborda diferentes dimensiones como son: la operacional, la administrativa, la económica, la social, los procesos de supervisión, monitoreo, y educación. En conjunto estas acciones buscan asegurar un abordaje integral que permita alcanzar eficiencia y sostenibilidad; dicha aproximación permite aportar al desarrollo comprendido en su sentido más amplio y no solo en el plano ambiental o de conservación del entorno natural (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Por lo expuesto, la GIDS es mucho más que una simple herramienta para el manejo adecuado de los residuos sólidos, y debe considerarse como un componente esencial para el cumplimiento de los objetivos globales de sostenibilidad (Naciones Unidas, 2018).

Evolución de la GIDS, según el Nivel de Ingresos

El nivel de ingresos de un país influye significativamente en el abordaje presupuestario de la GIDS. En los países de bajos ingresos las administraciones locales asignan a la gestión de residuos alrededor de un 20% de sus presupuestos a la gestión y disposición de los residuos sólidos. Esto sucede debido a las limitaciones de infraestructuras y recursos tecnológicos, así como a la baja capacidad de recaudación tributaria que caracteriza a los países de ingresos relativamente bajos. Esta proporción del 20% es un gran peso en la estructura presupuestaria de las administraciones locales y supera la participación que se puede constatar en países de ingresos más altos (Kaza, Yao, Bhada, & Van, 2018).

En los países con economías de ingresos medios, la gestión de residuos suele absorber más del 10% de los recursos asignados en los presupuestos locales. Esta diferencia refleja una transición hacia sistemas más estructurados y eficientes, apoyados por un crecimiento económico que facilita mejores prácticas de manejo y, acceso a mejor infraestructura y tecnología. Por el contrario, en los países de ingresos altos, la proporción del presupuesto destinada a la GIDS disminuye al 4%, gracias a la implementación de sistemas avanzados que priorizan la reducción, reutilización y reciclaje, optimizando los costos operativos (Kaza, Yao, Bhada, & Van, 2018).

Estas diferencias muestran cómo el impulso económico influye no solo en la proporción del presupuesto dedicada a la gestión de residuos, sino también en la efectividad de las soluciones implementadas. A medida que los países prosperan económicamente, logran gestionar los residuos de forma más eficiente con sistemas que equilibran sostenibilidad, tecnología y reducción de costos, ajustándose a las necesidades y capacidades de cada contexto económico (Kaza, Yao, Bhada, & Van, 2018).

Costos Totales en la GIDS en Ecuador

El costo total asociado a la GIDS en Ecuador comprende el valor económico que cada municipio asigna para llevar a cabo actividades como la recolección, transporte y disposición final de los desechos. Este cálculo incluye la utilización de recursos humanos y materiales, que son primordiales para garantizar el funcionamiento del sistema de manejo de residuos (Aguirre López & Ortega Castro, 2022). Los costos reflejan los requerimientos operativos de los municipios y su capacidad para atender las crecientes demandas asociadas a la gestión de residuos sólidos, especialmente en escenarios de expansión urbana y crecimiento poblacional.

Los costos operativos comprenden las actividades del sistema de la GIDS que abracen los procesos de recolección en los puntos de generación, la clasificación de desechos según su tipo, el transporte de hacia los sitios de disposición final, y el tratamiento y manipulación en esos lugares. La suma de estos procesos constituye la estructura de operativa del sistema, que representa una carga económica significativa en muchos municipios particularmente en el caso de los bajo ingresos y estructura limitada (Hernández, 2014).

Aguirre López y Ortega Castro (2022) señalan que la gestión de desechos en Ecuador muestra desafíos significativos, ya que los costos unitarios a estas acciones exponen una alta variabilidad entre los municipios. Estas diferencias obedecen a factores como la densidad de población, la infraestructura existente y las tecnologías utilizadas. En particular, los municipios más pequeños o con capacidades técnicas limitadas tienden a afrontar costos proporcionales más altos debido a las ineficiencias en sus métodos de recolección y de transporte.

La GIDS requiere desarrollar estrategias adaptativas que respondan a la realidad económica de cada administración local, con el objetivo de abordar los desafíos particulares que cada una enfrenta, en materia de expansión urbana, conservación ambiental, mitigación de las fuentes de contaminación, cuidado de la salud pública, desarrollo de infraestructura y capacidades locales, y creación de oportunidades económicas (Ministerio del Ambiente, 2023).

Economías de escala aplicadas a la GIDS

Según Kaza *et al* (2018), en la GIDS existen economías de escala, esto significa que a medida que el volumen de residuos procesados aumenta se pueden también disminuir los costos unitarios de su procesamiento. Las economías de escala son importantes en todas las actividades que comprenden la GIDS como son la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final. Para aprovechar estas economías de escala se

requiere conocer cuáles son las tecnologías apropiadas y más costo-eficientes para manejar diferentes volúmenes de desechos. Por ejemplo, las inversiones en tecnologías específicas como incineradoras y plantas de procesos de reciclaje resultan más convenientes cuando los costos fijos se distribuyen sobre una mayor cantidad de residuos. Adicionalmente, la centralización administrativa y consolidación de procesos contribuye a reducir los costos operativos y lograr mayor eficiencia. Sin embargo, en lugares donde la generación de desechos no alcanza grandes volúmenes y además se cuenta con una baja densidad poblacional resulta más difícil la reducción de costos unitarios a través del aprovechamiento de economías de escala. En estos lugares con baja densidad poblacional y generación limitada de desechos, los costos operativos y de inversión de la GIDS pueden superar los beneficios esperados de su gestión. Por lo tanto, el aprovechamiento de economías de escala no siempre puede ser el mismo y por ello la planificación de la GIDS debe ajustarse a la realidad de cada localidad. En conclusión, la implementación de la GIDS debe ir acompañada y puede beneficiarse de estrategias que fomenten la integración territorial, invitando a ejecutar alianzas y aglomeraciones entre localidades vecinas que permitan incrementar la escala, lo que finalmente permitirá aprovechar mejor las economías de escala, reducir los costos unitarios y alcanzar una gestión más costo-eficiente (Kaza, Yao, Bhada, & Van, 2018).

Marco Empírico

El marco referencial empírico facilita el análisis de la problemática de la GIDS mediante el análisis de datos y estudios realizados en diversas localidades.

Modelos Multicriterio en la GIDS

El estudio de Alcocer, Knudsen, Marrero y Miranda (2020) aplicó un modelo multicriterio con un enfoque matemático para optimizar la GIDS en el cantón Quevedo, Ecuador. Esta metodología integró variables económicas, sociales y ambientales mediante el uso del software GAMS (*General Algebraic Modeling System*), permitiendo analizar los factores que influyen a la sostenibilidad y eficiencia sistema de gestión de residuos urbanos. El enfoque multicriterio adoptado buscó abordar problemáticas identificadas en un diagnóstico inicial, como los altos costos operativos, las ineficiencias en el transporte y el desaprovechamiento dentro del sistema de gestión. Como parte de este estudio, la formulación del modelo matemático incluyó funciones objetivo orientadas a minimizar los costos operativos, reducir el uso de transporte, maximizar los beneficios sociales y optimizar los impactos ambientales. Para validar la propuesta, se analizaron diversos escenarios que evaluaron soluciones como la incorporación de nuevos puntos de separación, la mejora en la recuperación de materiales reciclables y la implementación de tecnologías modernas para el tratamiento de residuos. Estas estrategias permitieron fortalecer la eficiencia de la GIDS en el cantón Quevedo, abordando las problemáticas identificadas en el diagnóstico inicial. La aplicación de un modelo matemático optimizado para la GIDS en el cantón Quevedo, Ecuador, evidenció mejoras significativas en los parámetros de sostenibilidad evaluados. Utilizando el software GAMS en el escenario 7, se logró un aumento sustancial en la reducción del impacto ambiental, alcanzando un 3.437,25%, junto con una disminución del 95.54% en los costos operativos y un incremento del 13.24% en el beneficio social. Estos resultados refuerzan la efectividad del modelo para optimizar las principales variables de sostenibilidad dentro del sistema de residuos sólidos urbanos. Además, el estudio destaca que un enfoque basado en optimización permite obtener resultados superiores en comparación con los métodos operativos convencionales, subrayando la importancia de integrar herramientas matemáticas y estadísticas avanzadas en el diseño e implementación de estrategias sostenibles para la gestión de residuos (Alcocer, Knudsen, Marrero, & Miranda, 2020).

Los desafíos en la GIDS en Ecuador han sido evidentes en diversos estudios, reflejando una situación preocupante a nivel nacional entre los años 2002 y 2010. Según Alcocer, Knudsen, Marrero y Miranda (2020), de los 221 municipios analizados, 160 disponían sus desechos en botaderos a cielo abierto, generando graves impactos ambientales en el suelo, el agua y el aire, así como riesgos significativos para la salud pública, especialmente para los recicladores informales que operaban en condiciones precarias. Los otros 61 municipios implementaban un manejo de residuos con criterios técnicos insuficientes en áreas de disposición final parcialmente controladas. Este diagnóstico coincide con hallazgos previos en la literatura sobre la GIDS en contextos locales y regionales, lo que refuerza la necesidad de adoptar modelos matemáticos y herramientas de optimización para mejorar la sostenibilidad y eficiencia del sistema.

Estudios correlacionales no-experimentales

Un primer estudio se realizó en la Municipalidad de Aymaraes Perú, donde la ineficiente gestión de residuos ha generado impactos negativos en los ámbitos ambiental, social y económico (Coacalla Castillo, Pareja Cabrera, & Suarez Orellana, 2020). En este caso, se identificó una correlación significativa entre los indicadores de gestión y la calidad del manejo de residuos urbanos. Este hallazgo se obtuvo a través de un estudio con un diseño correlacional y no-experimental, lo que permitió analizar las relaciones entre variables sin intervención directa en el fenómeno observado.

Para analizar esta relación, el estudio evaluó cuatro dimensiones principales de los indicadores de gestión: limpieza pública, recolección, transferencia y disposición final. A través de un cuestionario aplicado a 380 habitantes de la municipalidad, se identificó una correlación positiva moderada (0,496) entre estos indicadores y la calidad del manejo de residuos urbanos. Además, el 74% de los encuestados percibió deficiencias en la prestación del servicio, evidenciando una insatisfacción generalizada. Este resultado contrasta con estudios realizados en otras regiones, como Valencia (España), donde la percepción sobre el manejo de residuos es más positiva (Agulló, González, & Abellán, 2011). Estas diferencias destacan la importancia de factores contextuales en la percepción y efectividad de la GIDS.

En este contexto, se destaca la necesidad de fortalecer la planificación estratégica y la implementación de políticas públicas efectivas para optimizar el manejo de residuos en Aymaraes. Además, se subraya la importancia de desarrollar programas de educación ambiental y fomentar la participación ciudadana como herramientas clave para mejorar la ecoeficiencia en las prácticas de gestión de residuos. Estas estrategias no solo contribuirán a optimizar el manejo de residuos, sino que también podrían transformar la percepción negativa de la población y promover un modelo de gestión más sostenible en la región (Sánchez, 2016).

Evolución y Distribución de Costos en la GIDS en Ecuador

En Ecuador, los municipios destinan entre el 10% y el 20% de sus presupuestos anuales a la gestión de residuos sólidos según el MAATE (2023). Entre 2017 y 2022, los costos anuales de la GIDS registraron un aumento sostenido, pasando de aproximadamente 290 millones de dólares en 2017 a 360 millones de dólares en 2022. Este incremento se atribuye al crecimiento poblacional, la expansión urbana y la necesidad de fortalecer la infraestructura de recolección y tratamiento de desechos en el país (Ministerio del Ambiente, 2023).

El aumento en los costos operativos también ha sido impulsado por las inversiones en tecnología, el fortalecimiento de los sistemas de reciclaje y la mejora en la disposición final de los residuos. De acuerdo con el Banco Mundial (2018) y estudios del MAATE (2020), la mayor parte del gasto en la GIDS se ha concentrado en la recolección y transporte, representando entre el 60% y el 70% del costo total del manejo de residuos sólidos (Kaza, Yao, Bhada, & Van, 2018).

En este sentido, el análisis de investigaciones previas ofrece información clave sobre las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos, proporcionando una base sólida para orientar y fundamentar este estudio. La optimización de la GIDS es fundamental para abordar los desafíos ambientales, sociales, y económicos que surgen del incremento en los costos operativos y la necesidad de una gestión más eficiente y sostenible de los residuos.

Los estudios cuantitativos, como los realizados en el cantón Quevedo, Ecuador, y la Municipalidad de Aymaraes, Perú, evidencian el valor de este enfoque para comprender los desafíos de la GIDS. Estos análisis permiten identificar oportunidades de optimización en los costos operativos y promover estrategias más sostenibles y eficientes en la gestión.

Para profundizar en el análisis de la evolución y distribución de costos en la GIDS, este estudio se basa en una base de datos obtenida de fuentes oficiales, como el INEC y el MAATE. Dicha base de datos está conformada por un panel de información detallada sobre los costos y características de la GIDS, así como aspectos geográficos y socioeconómicos de cada provincia del país durante el periodo 2017-2020. Este enfoque permite realizar un análisis cuantitativo riguroso que contribuya a la optimización del sistema y a la formulación de estrategias más eficientes y sostenibles. Asimismo, en la tabla 1 encontraremos variables con sus respectivos breviaros para el resto del artículo:

Tabla 1-Variables

| VARIABLES | ABREVIATURAS |
|---|---------------------|
| Año | ANIO |
| Provincia | PROV |
| Habitantes | HAB |
| Kilómetros Cuadrados | KM ² |
| Costo De Relleno Sanitario | CRS |
| Costo De Celda Emergente | CCE |
| Costo De Botadero | CB |
| Años De Escolaridad | ESCO |
| Analfabetismo | ALFA |
| Suministro De Electricidad Y Agua | ELLA |
| Densidad Poblacional | DP |
| Suministro De Electricidad Y Agua (Valor Agregado Bruto) | EYAPC |

Elaborado: Josselyn Sánchez.

Marco Metodológico

El presente estudio adopta un enfoque no experimental y descriptivo, basado en datos de panel, para comparar los costos de la GIDS en las provincias de Ecuador durante el periodo 2017-2020. Esta metodología permite analizar la evolución de los costos a lo largo del tiempo, así como las diferencias entre provincias, proporcionando una visión tanto transversal como longitudinal de la gestión de residuos en el país.

En esta investigación se basa en el uso de datos de panel como un enfoque sólido, que combina el análisis transversal, al contrastar distintas provincias ecuatorianas, con un análisis longitudinal a lo largo del tiempo.

Esta metodología permite identificar patrones recurrentes y evaluar el impacto de factores económicos, sociales y ambientales en los costos de la GIDS. Además, facilita el examen de la efectividad de las políticas públicas sobre la materia implementadas en cada provincia. Para garantizar la precisión del análisis y la fiabilidad de los resultados, este estudio se basa en información proveniente de fuentes oficiales, como los informes del INEC y el MAATE, correspondiente al periodo 2017-2020. La utilización de estos datos permite respaldar el rigor metodológico de la investigación, asegurando una base sólida para el estudio descriptivo de los costos unitarios a la GIDS. De esta manera, la investigación no solo permite analizar la evolución y distribución de los costos de la GIDS en Ecuador, sino que también proporciona una base empírica para la formulación de estrategias que mejoren su eficiencia y sostenibilidad. Al fundamentarse en datos oficiales y en un enfoque metodológico sólido, este estudio contribuye al desarrollo de políticas públicas más efectivas en la gestión de residuos.

En esta investigación se utiliza una base de datos de panel que abarca todas las provincias del Ecuador durante el periodo 2017-2020. Dicha base de datos incluye diversas variables para el análisis, las cuales se detallan en la tabla 2:

Tabla 2 - Diccionario de variables, descripción y unidades.

| VARIABLES | DESCRIPCIÓN | UNIDAD |
|-----------|--|--------------------------------------|
| ANIO | Año en que se realizó la observación | Número entero |
| PROV | Nombre de la Provincia del Ecuador | Objeto (texto) |
| CRS | Costo de Relleno Sanitario en dólares por tonelada | Dólares de los Estados Unidos |
| CCE | Costo de Celda Emergente en dólares por tonelada | Dólares de los Estados Unidos |
| CB | Costo de Botadero en dólares por tonelada | Dólares de los Estados Unidos |
| HAB | Cantidad de personas | Número entero |
| KM2 | Área | Kilómetros Cuadrados (con decimales) |
| ESCO | Promedio de años de educación por persona | Años de estudio (con decimales) |
| ALFA | Porcentaje de población analfabeta | Porcentaje de la población total |

Elaborado: Josselyn Sánchez.

El objetivo del análisis no solo es describir la evolución de los gastos asociados a la GIDS, sino también identificar patrones que permitan clasificar las provincias según las características de sus dinámicas económicas. En la Tabla 3 se presentan variables adicionales construidas para el estudio, las cuales guardan una estrecha relación con los costos de la GIDS y permiten un análisis más detallado de sus determinantes.

Tabla 3 - Variables analizadas

| TÍTULO | NOMBRE DE VARIABLES | UNIDADES |
|----------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Número de Habitantes | Densidad poblacional (DP) | #hab/km ² |
| Kilómetros ² | | |
| Costo de Relleno Sanitario | Costo total de disposición final (CT) | crs+cce+cb |
| Costo de Celda Emergente | | |
| Costo de Botadero | | |

Elaborado: Josselyn Sánchez.

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis exploratorio de los datos mediante estadística descriptiva, que incluyó el cálculo de medidas de tendencia central (Anexo 8) para evaluar la relación entre el costo total de disposición final y el periodo de tiempo. Además, se analizaron medidas de dispersión, como la relación entre el Costo de Relleno Sanitario (CRS) por provincias y el costo total de disposición final, así como la evolución de los Costos de Relleno Sanitario (CRS), Costos de Celdas Emergentes (CCE) y Costos de Botadero (CB) a lo largo de los años. Este análisis se complementó con visualizaciones gráficas para identificar patrones generales, tendencias y valores atípicos en los costos de gestión. Los hallazgos obtenidos en esta etapa sirvieron como base para la aplicación posterior de técnicas de ML.

En esta etapa del análisis, se aplicaron algoritmos de agrupamiento (*clustering*) como K-Means y DBSCAN para organizar y examinar los datos asociados con los costos de la GIDS. La combinación de ambos métodos permitió clasificar las provincias de Ecuador en grupos con características similares, enriqueciendo el análisis y mitigando las limitaciones inherentes a cada algoritmo cuando se emplea de forma individual (Han, Kamber, & Pei, 2012). Este enfoque resulta especialmente útil para manejar datos con estructuras complejas y variaciones significativas, proporcionando una representación más precisa de las diferencias en los costos entre las provincias del país.

El análisis inicial emplea técnicas de estadística descriptiva para identificar patrones generales, tendencias y valores atípicos en los costos operativos de la GIDS. En cada fase, se calculan indicadores esenciales, como la media y la desviación estándar, reflejados en los (Anexo 6 y 7). La representación gráfica de estos indicadores proporciona una base estructurada para la posterior aplicación, de algoritmos de aprendizaje no supervisado (*clustering*). Además, la interpretación de estas dinámicas y la visualización de los resultados preliminares permiten desarrollar estrategias territoriales más efectivas, facilitando una mejor comprensión de las diferencias en la gestión de residuos entre localidades.

El uso de algoritmos de agrupamientos permitió segmentar las provincias en función de los costos unitarios relacionados a la GIDS. Sin embargo, para fortalecer este análisis, se aplicaron técnicas estadísticas que validaron las agrupaciones e identificaron patrones atípicos.

El uso de las medidas de centralidad, gráficos de dispersión y el análisis de agrupamiento facilita la interpretación de las relaciones entre variables estudiadas. A través de esta herramienta gráfica, se identifican diferencias en los costos unitarios entre provincias, los cuales están influenciadas por factores como la densidad poblacional, las características geográficas y la capacidad administrativa de cada localidad.

Los resultados obtenidos destacan la capacidad de los algoritmos aplicados para capturar y explicar la heterogeneidad en los costos unitarios de la GIDS en las provincias y cómo se relacionan unas provincias con otras en relación a dichos costos. Este enfoque puede contribuir al diseño de estrategias de políticas públicas más adecuadas, alineadas con las particularidades de cada provincia ecuatoriana.

Los algoritmos seleccionados son:

- ***K-means clustering***: Este algoritmo utiliza una técnica de agrupamiento no supervisado ampliamente utilizado en minería de datos y el análisis de patrones. Su objetivo principal es dividir un conjunto de datos en k (*cluster*), donde cada *cluster* está representado por un centroide. El algoritmo busca minimizar la variabilidad dentro de cada *cluster* y maximizar la separación entre ellos, optimizando así la estructura de los datos. Este método es particularmente eficaz cuando los datos presentan una distribución bien definida, ya que agrupa observaciones con características similares, facilitando la

identificación de patrones y tendencias en la información analizada. (James, Witten, Hastie, Tibshirani, & Taylor, 2023)

Según James *et al.* (2023), el algoritmo de *K-Means* comienza con la selección de k centroides, los cuales pueden ser generados aleatoriamente o mediante algoritmos de inicialización específicos como *K-Means++*. A continuación, cada punto del conjunto de datos se asigna al centroide más cercano, utilizando una métrica de distancia, generalmente la euclidiana. Luego, los centroides se recalculan como el promedio de los puntos asignados a cada grupo. Este proceso de asignación y ajuste se repite de manera iterativa hasta que los centroides convergen, es decir, hasta que sus posiciones dejan de cambiar significativamente.

El algoritmo *K-Means* se destaca por su simplicidad y rapidez, lo que lo convierte en una herramienta eficaz para procesamiento de grandes volúmenes de datos (James, Witten, Hastie, Tibshirani, & Taylor, 2023; Management Solutions, 2020). Sin embargo, estos autores también señalan algunas limitaciones, como la sensibilidad a la selección inicial de centroides, lo que puede hacer que el algoritmo quede atrapado en mínimos locales. Además, su desempeño se ve afectado en escenarios donde los *clusters* tienen formas no esféricas, tamaños heterogéneos o contienen datos atípicos que pueden distorsionar el análisis.

La determinación del número óptimo de *cluster* (k) representa un desafío significativo según James *et al.* (2023) y Ferdiansyah *et al.* (2024). Métodos como el codo y el coeficiente de silueta se utilizan para estimar el valor más adecuado de k ; sin embargo, su interpretación depende en gran medida de la experiencia del analista y de las características del conjunto de datos. Por ello, se recomienda combinar estos enfoques con otras técnicas o aplicar validación cruzada para mejorar la precisión y el desempeño del algoritmo.

En el ámbito de la gestión de desechos sólidos, el algoritmo *K-Means* permite identificar grupos de provincias con características similares en cuanto a costos unitarios de la GIDS y crear una base de información para analizar estrategias de optimización adaptadas a las necesidades específicas de cada *cluster* identificado.

- **DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise):** Es un algoritmo de agrupamiento basado en densidad, diseñado para identificar *cluster* de cualquier forma y manejar datos con ruido. A diferencia de otros métodos, no requiere definir previamente el número de *cluster* y clasifica los datos en tres categorías: puntos centrales, puntos de borde y ruido. Según James *et al.* (2023), esta característica lo hace especialmente útil para el análisis de datos no estructurados y distribuciones complejas.

DBSCAN se basa en dos parámetros principales: ϵ , que define el radio del cual un punto se considera vecino de otro, y *MinPts*, que determina el número mínimo de puntos necesarios para que una región sea considerada densa (Management Solutions, 2020; James, Witten, Hastie, Tibshirani, & Taylor, 2023). Los puntos que cumplen con ambos criterios se denominan centrales y pueden formar el núcleo de un *cluster*. Los puntos de borde son aquellos que están ubicados dentro del radio ϵ de un punto central, pero que por sí mismo no cumplen con el criterio de densidad. Finalmente, los puntos que no pertenecen a ningún *cluster* se clasifican como ruido.

El algoritmo DBSCAN inicia seleccionando un punto aleatorio. Si este cumple con los criterios de densidad, se expande para formar un *cluster*, incorporando todos los puntos densamente conectados. Este proceso se repite hasta que todos los puntos han sido procesados, según lo explicado por James *et al.* (2023). Su capacidad para manejar ruido y detectar *cluster* con formas arbitrarias lo convierte en una herramienta robusta, especialmente útil en conjuntos de datos con variabilidad en densidad o estructuras no lineales.

No obstante, la efectividad de DBSCAN depende en gran medida de la selección adecuada de los parámetros ϵ y MinPts. Una configuración incorrecta puede generar un exceso o una falta de agrupamientos, afectando la calidad del análisis. Para mitigar este problema, se recomienda realizar pruebas iterativas y combinar el estudio visual con criterios cuantitativos para optimizar la selección de los parámetros.

En la GIDS, DBSCAN resulta especialmente útil para identificar provincias con patrones atípicos o características únicas, como costos extraordinarios de disposición final o infraestructuras de manejo de residuos que difieren significativamente del promedio. Además, su capacidad para manejar ruido permite excluir valores atípicos que podrían distorsionar las conclusiones generales, mejorando así la precisión del análisis (Ester, Kriegel, Sander, & Xu, 1996; Ferdiansyah, y otros, 2024).

Esta investigación analiza la GIDS mediante la implementación y combinación de los algoritmos de *clustering* K-Means y DBSCAN, complementados con el método del codo. Este enfoque metodológico permite segmentar y examinar datos complejos relacionados con los costos operativos en las provincias del Ecuador. Según Han, Kamber y Pei (2012), los algoritmos de *clustering* son herramientas fundamentales para optimizar procesos y diseñar estrategias basadas en datos, especialmente en contextos con características heterogéneas. En este caso, la GIDS presenta variaciones significativas en costos y factores socioeconómicos, lo que exige un análisis sólido que facilite la identificación de patrones relevantes y diferencias territoriales.

El método del codo, desarrollado por MacQueen (1967) y ampliado por Hartigan y Wong (1979), fue empleado para determinar el número óptimo de *cluster* en K-Means. Este enfoque se basa en el análisis de la inercia, una métrica que mide la cohesión interna de los grupos a través de la suma de las distancias cuadráticas entre los puntos y sus centroides. El punto de inflexión en el gráfico de inercia, conocido como el "codo", indica el equilibrio entre la precisión del modelo y su simplicidad. Este criterio es esencial para segmentar datos de manera más efectiva y garantizar la representatividad de los resultados. Aunque el método del codo no se aplica directamente a DBSCAN debido a sus diferencias conceptuales, Ester *et al.* (1996) señalan que puede utilizarse parcialmente como referencia para evaluar la densidad y coherencia de los *clusters* generados.

La combinación de K-Means y DBSCAN permite aprovechar las fortalezas de ambos algoritmos para abordar las particularidades de los datos de la GIDS. K-Means facilita la agrupación de provincias según similitudes en los costos de actividades como recolección, transporte y disposición final, mientras que DBSCAN complementa el análisis al identificar *cluster* con formas irregulares y gestionar datos atípicos de manera más eficiente.

Este enfoque metodológico resulta especialmente útil en contextos donde las características de los datos presentan variaciones significativas entre territorios (Management Solutions, 2020; James, Witten, Hastie, Tibshirani, & Taylor, 2023), como ocurre en las provincias ecuatorianas. La combinación de K-Means y DBSCAN permite segmentar de manera más precisa las diferencias en los costos unitarios de la GIDS, mejorando la interpretación de los datos y facilitando el diseño de estrategias adaptadas a cada región del Ecuador.

La aplicación de esta metodología permitió analizar la relación entre factores como la densidad poblacional y el valor agregado de los suministros de agua y electricidad con los costos unitarios de la GIDS. Además, facilitó la identificación de provincias con características particulares que requieren enfoques diferenciados. Los datos utilizados fueron obtenidos de fuentes oficiales, como el INEC (2022) y MAATE (2023), y los resultados se representaron gráficamente mediante medidas de centralidad y dispersión, complementadas con visualizaciones tridimensionales para un análisis más detallado de los *clusters* y las relaciones entre variables. Estas representaciones no solo mejoraron la interpretación de los hallazgos, sino que también proporcionaron

una base sólida para el diseño de estrategias informadas, la optimización en la asignación de recursos y el fortalecimiento de una gestión más sostenible de los desechos sólidos a nivel nacional.

Resultados y discusión

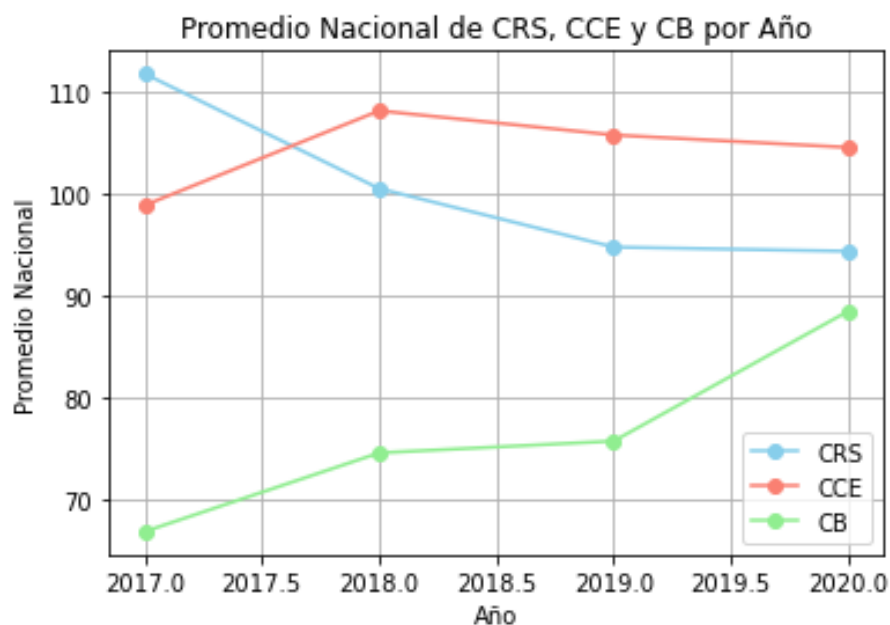
La presente investigación realiza un análisis descriptivo de los costos de la GIDS a nivel provincial (Anexo 4) y variables asociadas relevantes para identificar patrones y agrupaciones significativas que permitan identificar diferentes realidades y necesidades, así como oportunidades de aprendizaje y mejores prácticas para la gestión de los desechos en Ecuador. Se parte de un ejercicio de estadística descriptiva para luego, mediante los algoritmos K-Means y DBSCAN (Anexo 10), realizar un entrenamiento de aglomeración (*clustering*) utilizando variables asociadas relevantes como la densidad poblacional (DP) y el valor agregado bruto de los suministros de agua y electricidad (EYA). Este análisis ofrece una visión de la realidad de la GIDS en las provincias y sus dinámicas territoriales, durante el periodo de estudio, permitiendo identificar patrones generales y casos específicos que requieren diferentes tipos de abordaje para implementar una mejora en el desempeño de los costos unitarios de la GIDS.

A continuación, se presentan las gráficas que ilustran estos hallazgos, mostrando relaciones entre variables clave y las disparidades territoriales en los costos unitarios de la GIDS, valiosas para orientar la planificación hacia soluciones adecuadas a las necesidades locales.

Estadística descriptiva:

El gráfico 1, analiza la evolución del promedio nacional (Anexo 9), de tres indicadores claves en la GIDS en Ecuador entre 2017 y 2020: el Costo Relleno Sanitario en dólares por tonelada (CRS), Costo Celda Emergente en dólares por tonelada (CCE) y el Costo de Botadero en dólares por tonelada (CB). Cada indicador muestra tendencias diferenciadas que reflejan las dinámicas y desafíos específicos de la GIDS en el periodo de estudio.

Gráfico 1- Promedio Nacional de CRS, CCE y CB por año (2017-2020).



Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

Durante el período 2017-2020, los costos unitarios de la GIDS en Ecuador muestran una evolución heterogénea en las tres categorías principales: CRS, el CCE y el CB. A continuación, se analiza cada caso.

Los CRS evidencia una disminución constante a lo largo de los años analizados, lo que refleja una tendencia hacia la reducción de los costos unitarios en la gestión de rellenos sanitarios. En 2017, el costo promedio por tonelada gestionada se situaba en 112 dólares. Posteriormente, en 2018, este valor descendió a 100 dólares por tonelada, marcando una reducción del 10.71%. En 2019, el costo continuó disminuyendo, alcanzando los 95 dólares por tonelada, lo que representó una reducción adicional del 5%. En cambio, en el 2020, el costo por tonelada gestionada se estabilizó en 94 dólares, evidenciando una disminución del 1.05% respecto al año anterior.

Este comportamiento podría estar vinculado a la implementación de mejores prácticas en la operación de los rellenos sanitarios, la incorporación de tecnologías más eficientes y el fortalecimiento de políticas orientadas a la sostenibilidad. Estos factores han sido destacados por organismos como el Banco Mundial (2018) y Naciones Unidas (2018), quienes resaltan que las inversiones en infraestructura moderna y los programas de capacitación en GIDS contribuyen significativamente a reducir los costos unitarios, además de minimizar el impacto ambiental.

El análisis de los costos unitarios de la gestión de celdas emergentes (CCE) muestra fluctuaciones significativas durante el período 2017-2020. En 2017, el costo promedio fue de 99 dólares por tonelada gestionada. En 2018, se observó un aumento del 9.09%, alcanzando los 108 dólares por tonelada. Sin embargo, en 2019, los costos disminuyeron a 105 dólares por tonelada, lo que figura una reducción del 2.78%. Por otro lado, en 2020, los costos se incrementaron nuevamente a 113 dólares por tonelada, marcando un aumento del 7.62%. En términos globales, los costos unitarios de las celdas emergentes tuvieron un incremento acumulado del 14.14% durante el período examinado.

Las fluctuaciones observadas en los CCE pueden explicarse por factores económicos, tecnológicos y ambientales. Por ejemplo, Geyer *et al.* (2017) recalca que la variabilidad en los costos de la GIDS que está influida por la innovación en tecnologías de tratamiento y las diferencias en la eficiencia operativa entre regiones (Geyer, Jambeck, & Law, 2017). Además, se ha reportado que los costos pueden aumentar cuando las soluciones de gestión temporal, como las celdas emergentes, se implementan en respuesta a la falta de infraestructura adecuada, lo que eleva los gastos operativos y logísticos. Estos cambios también se ven afectados por el costo creciente de materiales de construcción y mano de obra (International Solid Waste Association, 2020).

El análisis de los costos unitarios en la gestión de botaderos muestra un aumento constante durante el período 2017-2020. En 2017, el costo promedio por tonelada gestionada fue de 67 dólares, incrementándose a 75 dólares en 2018, lo que representa un aumento del 11.94%. En 2019, los costos continuaron en ascenso, alcanzando los 77 dólares por tonelada, con un aumento adicional del 2.67%. Además, en 2020, se registró un incremento significativo del 14.29%, situándose en 88 dólares por tonelada. En total, los costos experimentaron un aumento acumulado del 31.34% entre 2017 y 2020.

El aumento en los CB puede atribuirse a factores como el incremento en los costos de operación y mantenimiento, el cumplimiento de regulaciones ambientales más estrictas y la mayor complejidad en la gestión de residuos no tratados. Los botaderos no controlados representan desafíos operativos que a menudo resultan en mayores costos debido a la necesidad de mitigar impactos ambientales y sociales. Asimismo, la falta de inversiones iniciales en infraestructura adecuada puede llevar a un aumento progresivo de los costos unitarios

en sistemas de disposición ineficientes. Por último, el manejo de residuos en botaderos suele enfrentar problemas como el aumento en los precios de la tierra y la implementación de medidas paliativas para reducir emisiones y lixiviados, lo cual encarece las operaciones (International Solid Waste Association, 2020).

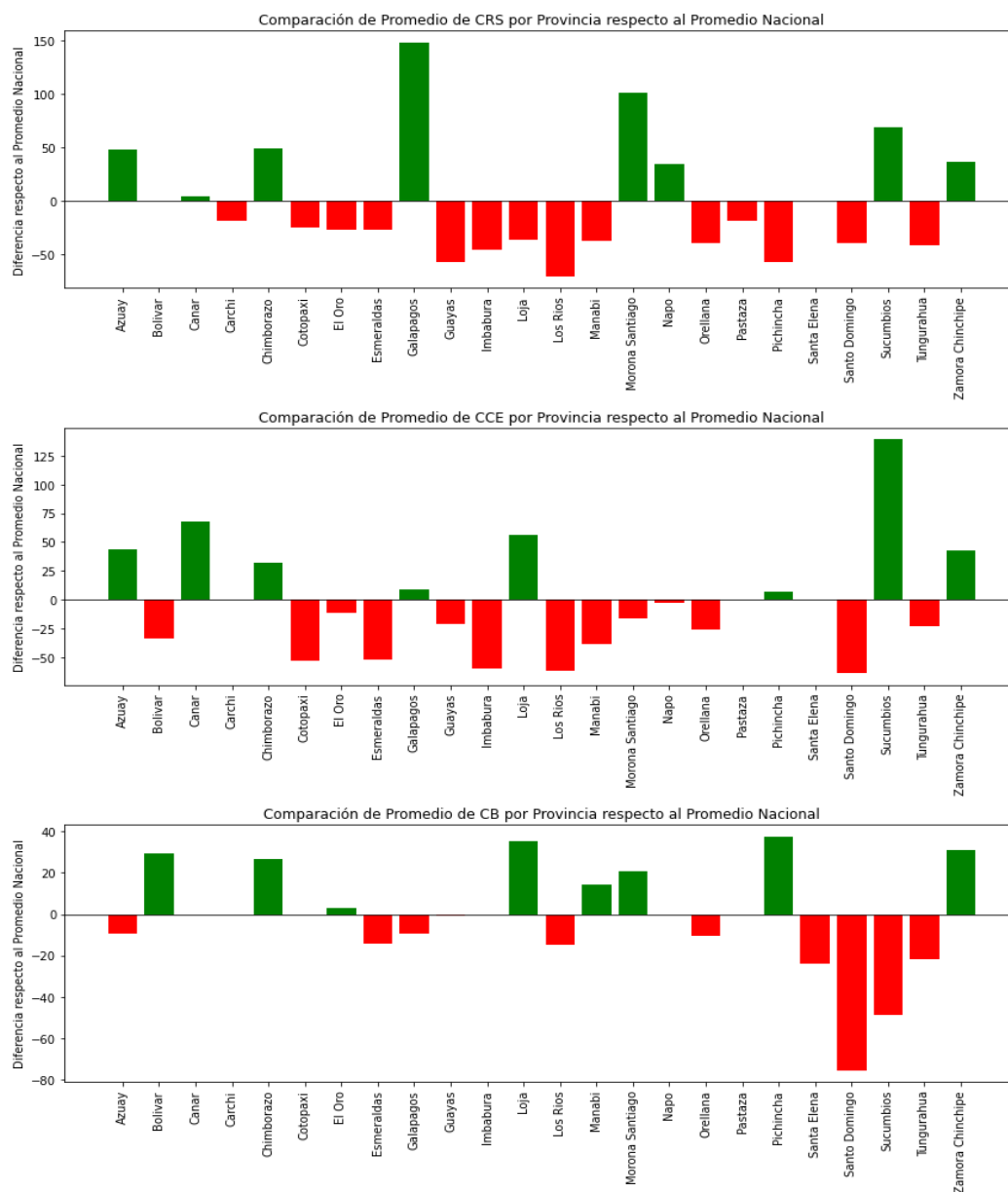
En términos generales, las dinámicas observadas en los tres indicadores reflejan un panorama mixto en los costos unitarios de las diferentes tecnologías empleadas en la GIDS en Ecuador. La reducción en los costos por tonelada de los rellenos sanitarios (CRS) resalta su eficiencia operativa, posicionándolos como la alternativa más costo-eficiente, además de ser la más limpia y más conveniente para el ambiente. Sin embargo, surge la necesidad de garantizar su capacidad a largo plazo. Por su parte, las celdas emergentes (CCE) presentan una tendencia creciente de sus costos por tonelada que, aunque es pequeña, evidencia las limitaciones inherentes a su carácter de solución temporal y técnicamente inadecuada, lo que dificulta su integración en estrategias sostenibles. En contraste, los costos unitarios de los botaderos (CB) destacan por su marcada tendencia creciente en, además de que los botaderos están asociados a impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública, lo que los convierte en la opción menos adecuada y costo-eficiente.

Esta observación, basada en el criterio de mejorar la dinámica de costo-eficiencia resalta la necesidad de diseñar políticas públicas enfocadas a transitar hacia un mayor uso de rellenos sanitarios, evitar en lo posible el uso de celdas emergentes y eliminar la implementación de botaderos en el mediano y largo plazo. La priorización de la modernización y sostenibilidad de los rellenos sanitarios es clave para optimizar la GIDS en Ecuador, ya que han demostrado ser la alternativa más eficiente y económica durante el período analizado. Las provincias han mejorado su capacidad de utilizar los rellenos sanitarios, logrando una gestión más costo eficiente por tonelada de residuos. En contraste, las celdas emergentes, aunque funcionales como solución temporal, resultan más costosas y menos sostenibles. Los botaderos, por su parte, representan la opción más perjudicial, no solo por la tendencia creciente de sus costos por tonelada, sino también por los riesgos que implican para la salud pública y el medio ambiente debido a la falta de control y los impactos negativos propios de esta forma de disposición de desechos.

Durante el período 2017-2020, se ha observado un aumento constante en las toneladas de residuos generados. No obstante, entre las tecnologías empleadas en la GIDS, solo el relleno sanitario presenta una tendencia descendente en sus costos unitarios (CRS), lo que evidencia su capacidad para aprovechar economías de escala. Esto significa que, al incrementarse el volumen de residuos procesados, los costos por unidad disminuyen, convirtiendo a los rellenos sanitarios en una opción más eficiente. En contraste, los costos unitarios de las celdas emergentes como los de los botaderos (CCE, CB) muestran un comportamiento ascendente durante el periodo de estudio, reflejando su dificultad para manejar el incremento en el volumen de desechos y su incapacidad para beneficiarse de las economías de escala. Este análisis resalta la importancia de priorizar el desarrollo y fortalecimiento de la utilización de los rellenos sanitarios en la GIDS como la tecnología más adecuada y costo eficiente.

El gráfico 2, compara los costos unitarios promedio de cada provincia de tres indicadores clave de la GIDS: el CRS, el CCE y el CB, analizando sus diferencias respecto al promedio nacional, estimados para el periodo de estudio. Este análisis revela disparidades importantes entre las provincias, que son reflejo de sus características geográficas, demográficas y capacidades de infraestructura y operativas.

Gráfico 2- Comparación y Diferencia de Promedio Nacional por Variables a las provincias.



Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

Como se puede observar para el caso de los CRS, las provincias de Pichincha y Guayas, que presentan alta densidad poblacional, registran costos relativamente bajos en comparación con el promedio nacional. Esto podría explicarse por economías de escala y la implementación de infraestructuras modernas, lo que reduce los costos unitarios de disposición final. Sin embargo, resulta interesante el caso de Los Ríos, que, a pesar de tener una menor densidad poblacional, exhibe costos aún más bajos, lo que sugiere, la necesidad de un análisis más detallado para comprender los factores que contribuyen a esta reducción de costos.

Por otro lado, provincias como Galápagos enfrentan costos significativamente más altos, principalmente debido a los elevados costos logísticos asociados al transporte marítimo. Asimismo, en las provincias amazónicas de Morona Santiago y Sucumbíos, los costos de gestión de rellenos sanitarios también son relativamente altos.

Esto podría atribuirse a su baja densidad poblacional, la necesidad de protección de áreas naturales y las características agrestes de su vegetación y topografía, que incrementan los costos de construcción y mantenimiento de esta infraestructura. Estos hallazgos son consistentes de los estudios del Banco Mundial (2018), los cuales destacan la influencia el impacto de la geografía y la densidad poblacional en los costos de disposición final de residuos.

El CCE también presenta una importante variabilidad entre las provincias. Esto se debe a que las celdas emergentes son soluciones transitorias utilizadas cuando los sistemas más permanentes, como los rellenos sanitarios, alcanzan su capacidad máxima o no están disponibles. El gráfico 2 muestra que Sucumbíos registra el costo más alto en la gestión de celdas emergentes, seguido Cañar y Loja. Según datos del INEC (2019), en estas provincias las celdas emergentes son empleadas en ciertos sectores debido a la falta de alternativas más sostenibles. Por otro lado, provincias como Guayas, Los Ríos y Santo Domingo de los Tsáchilas, a pesar de presentar costos menores al promedio nacional, también recurren a esta estrategia. Esto se debe a su alta generación de residuos y a la necesidad de disponer de soluciones temporales para evitar la acumulación de desechos, lo que indica una dependencia de estas celdas como medida provisional.

Además de las diferencias observadas en los CRS y las CCE, el CB también muestra una marcada disparidad entre provincias. Provincias como Pichincha, Bolívar, Zamora Chinchipe y Loja presentan costos más elevados en la gestión de botaderos (barras verdes), lo que podría estar relacionado con regulaciones ambientales más estrictas o con una gestión de residuos más estructurada, factores que encarecen su operación. En estos casos, la implementación de controles ambientales y sanitarios rigurosos puede estar contribuyendo al aumento de los costos de disposición final en este tipo de tecnología. Por el contrario, provincias como Santo Domingo, Sucumbíos y Santa Elena (barras rojas) registran costos significativamente más bajos. Esto podría indicar una menor inversión en infraestructura de disposición final o la persistencia del uso de botaderos a cielo abierto con menor control ambiental. Esta situación es preocupante, ya que los botaderos sin medidas adecuadas de control pueden generar impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de evaluar las condiciones de disposición final de residuos en las provincias con costos particularmente bajos, dado que podrían estar asociadas a prácticas menos sostenibles. Esto coincide con los reportes del MAATE (2017), que advierten sobre los riesgos ambientales y sanitarios vinculados al uso de botaderos sin regulaciones adecuadas.

Este contraste pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el análisis de los CB relativamente bajos en ciertas provincias para comprender sus causas y evaluar sus posibles impactos. Identificar los factores que influyen en estas diferencias permitirá diseñar estrategias más eficaces para mejorar la sostenibilidad en la disposición final de residuos y garantizar el cumplimiento de normativas ambientales, minimizando así los efectos negativos en el ecosistema y la salud pública.

El estudio de los costos unitarios de las diferentes tecnologías aplicadas a la GIDS revela una marcada heterogeneidad entre las provincias del Ecuador. Este fenómeno está influenciado por factores como densidad poblacional, actividad económica, características geográficas, infraestructura disponible y estrategias de gestión implementadas.

Provincias como Galápagos y Guayas presentan costos significativamente altos en diversas métricas, lo que podría explicarse, en parte, por las limitaciones para aprovechar economías de escala. En Galápagos, la baja densidad poblacional, junto con la dispersión geográfica y el reducido volumen de desechos procesados, dificulta la disminución de costos unitarios, lo que incrementa el gasto por tonelada.

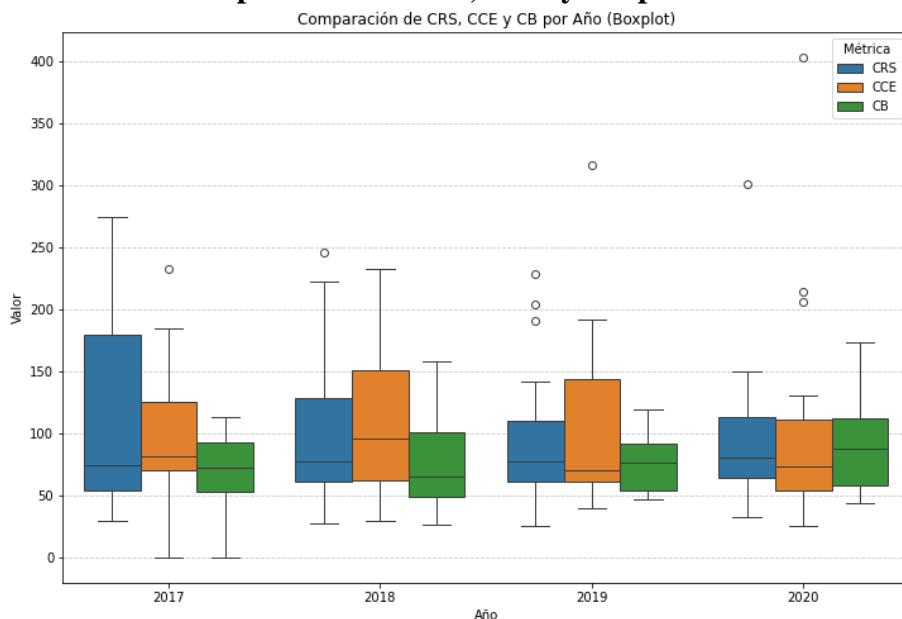
Por otro lado, en Guayas, a pesar de contar con una alta densidad poblacional, los elevados costos reflejan el desafío de gestionar grandes volúmenes de residuos en un entorno complejo, donde los costos operativos pueden ser más altos debido a la magnitud de los procesos de recolección, transporte y tratamiento.

En contraste, provincias como Tungurahua y Santo Domingo reportan costos inferiores al promedio nacional. Este comportamiento se explica por su capacidad para aprovechar economías de escala en contextos con mayor densidad poblacional. En estas regiones, la concentración de habitantes facilita la distribución de los costos operativos entre un número mayor de usuarios, optimizando recursos y reduciendo los costos unitarios de gestión.

Estos resultados demuestran que las economías de escala son más alcanzables en provincias intermedias, pero densamente pobladas, donde los costos relativos de transporte, logística y operación pueden mantenerse bajos, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los residuos sólidos.

En el gráfico 3, *boxplot*, se puede observar la evolución de la dispersión de los costos unitarios a la GIDS en Ecuador durante el periodo 2017-2020, considerando tres indicadores clave: el CRS, el CCE y el CB (Anexo 1, 2 y 3). Este análisis permite observar las variaciones anuales, la dispersión de los datos (Anexo 4) y la presencia de valores atípicos (Anexo 5), lo que refleja las dinámicas territoriales y los desafíos asociados a cada categoría.

Gráfico 3- Comparación de CRS, CCE y CB por año 2017-2020.



Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

El CRS presenta una alta dispersión en 2017, con valores que superan los 250 dólares por tonelada y una mediana cercana a 150 dólares por tonelada. Sin embargo, en los años posteriores, la dispersión disminuye y la mediana se estabiliza, lo que sugiere una mayor homogeneidad en los costos unitarios de implementación de rellenos sanitarios a nivel nacional. No obstante, la presencia de valores atípicos en 2018 indica desafíos específicos en algunas provincias, posiblemente relacionados con infraestructuras insuficientes o costos logísticos elevados. Para 2019 y 2020 estos valores atípicos están menos distantes de la media.

En el caso del CCE, se observa una mayor variabilidad en 2018 y 2019, con un pico que superan los 200 dólares por tonelada en 2018 y medianas en torno a los 100 dólares por tonelada. Este comportamiento sugiere un

aumento en la adopción de celdas emergentes como solución transitoria para la disposición de residuos, lo que refleja una dependencia de estrategias de gestión improvisadas antes la falta de infraestructura permanente. Según Geyer *et al.* (2017), los costos elevados de las celdas emergentes suelen estar relacionados con limitaciones operativas y la ausencia de alternativas viables en las regiones más afectadas. Para 2020, se observa una ligera reducción en la dispersión, lo que podría indicar una transición progresiva hacia soluciones más planificadas y estructuradas en la disposición de residuos.

Por su parte, el CB es el más volátil de los tres indicadores, con medianas cercanas a 50 dólares por tonelada durante todo el periodo. Sin embargo, en 2020, se evidencia una reducción de la dispersión. Este comportamiento podría estar alineado con políticas de transición hacia sistemas más sostenibles, que buscan asegurar reducir la dependencia de botaderos a cielo abierto en favor de opciones más reguladas y ambientalmente seguras.

Sin embargo, la persistencia de valores extremos y diferencias en la dispersión refleja desigualdades significativas en los costos unitarios de las GIDS entre provincias, influenciadas por factores como la infraestructura disponible, las características geográficas y las capacidades administrativas.

En este contexto, los rellenos sanitarios emergen como la alternativa más viable y sostenible, ya que muestran convergencia hacia una mayor estabilidad en los costos y menor volatilidad en comparación con las celdas emergentes y los botaderos. Estas últimas presentan una dispersión que se mantiene y fluctúa, lo que las convierte en alternativas menos confiables y menos sostenibles en términos de costos unitarios.

Aglomeración o *clustering*

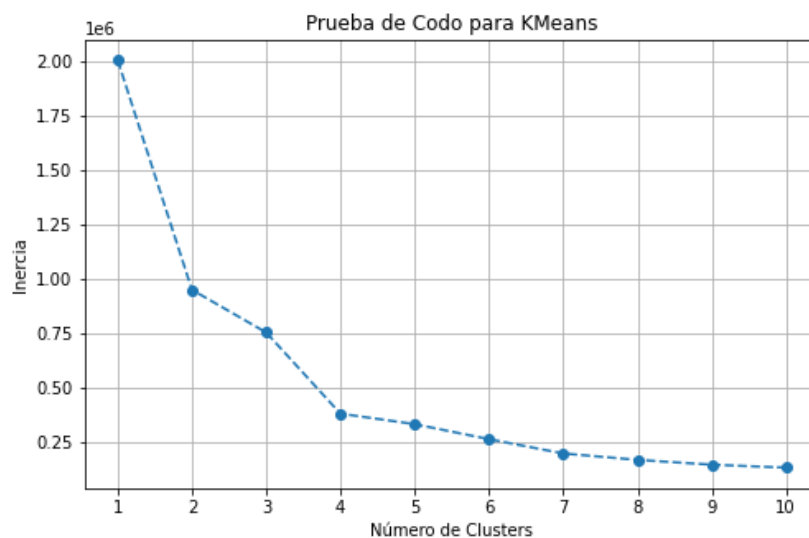
En este apartado se aplicarán técnicas de ML, en particular algoritmos de *clustering*, para analizar los costos unitarios de la GIDS en las provincias del Ecuador durante el período 2017-2020.

El *clustering* es una metodología analítica que permite agrupar observaciones con características similares, facilitando la identificación de patrones subyacentes y factores determinantes de la heterogeneidad de los costos. Este enfoque busca proporcionar una visión más estructurada y rigurosa de las dinámicas territoriales en la gestión de residuos, permitiendo fundamentar estrategias para optimizar recursos y fortalecer la sostenibilidad del sistema. Además, ayuda a identificar casos exitosos y reconocer la necesidad de implementar alternativas tecnológicas adecuadas a cada contexto provincial.

Para iniciar con el primer algoritmo, K-Means, se debe partir de definir el número de *clusters* o grupos con que vamos a trabajar. Como se explicó en el apartado metodológico, el método de codo es una técnica útil para definir este primer paso. El gráfico 4 muestra la relación entre la métrica de inercia y el número de *clusters*, evidenciando una rápida disminución de la inercia conforme se incrementa el número de *clusters*, hasta alcanzar un punto crítico conocido como el "codo". Este punto representa el número óptimo de *clusters*, a partir del cual seguir aumentando el número de grupos no mejora significativamente la reducción de la inercia, pero si incrementa la complejidad del modelo.

Este análisis inicial es crucial para seleccionar adecuadamente el número de *clusters*, asegurando una segmentación eficiente de los datos. A partir de esta división en grupos, se podrán extraer aprendizajes más profundos sobre la heterogeneidad en los costos unitarios de la GIDS, lo que facilitará una discusión más detallada sobre las dinámicas territoriales y la formulación de estrategias más efectivas para la gestión de residuos.

Gráfico 4 -Prueba de Codo para K-Means.



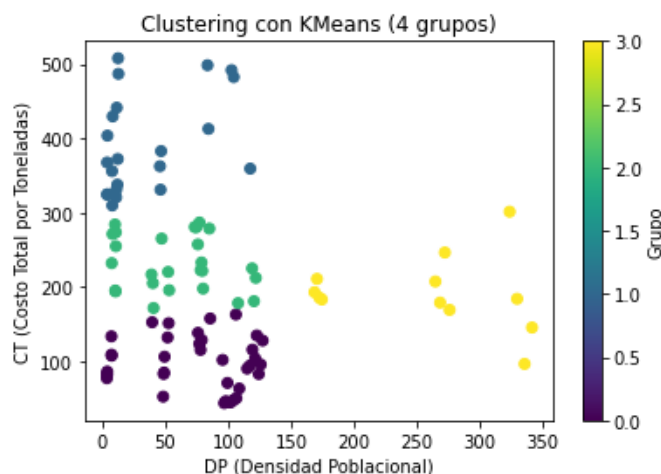
Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

Al graficar la inercia en función del número de *clusters*, se identifica un punto de inflexión en 4 *clusters*, lo que sugiere un equilibrio óptimo entre la reducción de la inercia y la simplicidad del modelo. Aunque la inercia sigue disminuyendo con un mayor número de *cluster*, esta reducción se vuelve marginalmente despreciable, lo que indica que añadir más *clusters* no aporta beneficios significativos y solo aumenta complejidad del modelo. Este análisis respalda la elección de 4 *clusters* como el balance ideal entre cohesión interna y simplicidad, permitiendo una segmentación eficiente de los datos sin comprometer la interpretabilidad del modelo.

La implementación del algoritmo K-Means con 4 *clusters* permite segmentar los datos de manera efectiva, considerando la densidad poblacional en el eje de las abscisas y el CT en el eje de las ordenadas. Esta agrupación genera *clusters* claramente diferenciados, representados por colores distintivos en la visualización. Además de validar la efectividad del modelo en la identificación de patrones significativos en los datos, este resultado refuerza la utilidad del método del codo como herramienta clave para optimizar la interpretación de las relaciones entre las variables en el análisis de los costos de la GIDS.

Aportes de estudios previos como el de Umargono y Endro (2020) y Cárdenas *et. al* (2021) sugieren que la prueba del codo aplicada en K-Means puede ser útil para definir el número de grupos que permitan agrupar las provincias en función de sus costos de gestión de residuos, facilitando la identificación de patrones de costos y similitudes estructurales entre provincias. Los conocimientos obtenidos a partir de la agrupación pueden ser utilizados por los responsables de la formulación de políticas para diseñar estrategias más eficaces adaptadas a cada provincia, facilitando así una mejor toma de decisiones y el desarrollo de prácticas sostenibles. Por lo tanto, el uso de *clustering* en este estudio puede construir no solo a mejora el análisis y la optimización de los costos de la GIDS, sino que también contribuye a la adopción de estrategias más eficientes y sostenibles para la gestión de residuos.

Gráfico 5- Clustering con K-Means de CT y DP (4 clusters).



Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

El Gráfico 5, generado mediante el algoritmo K-Means, con cuatro *clusters*, permite analizar la relación de la densidad poblacional (DP) y el costo total por tonelada (CT) de la GIDS. Esta segmentación permite identificar patrones específicos en la gestión de residuos y resaltar diferencias fundamentales en la relación entre estas variables.

Un aspecto relevante en el gráfico es la presencia de un área vacía en la esquina superior derecha, lo que indica que, durante el período de estudio, no existen provincias con combinaciones de alta densidad poblacional y altos costos unitarios. Esto sugiere que, en las regiones más densamente pobladas, las economías de escala se aprovechan de manera efectiva reduciendo los costos unitarios de la GIDS.

El *clusters* de color púrpura agrupa provincias con densidad poblacional baja (inferior a 150 habitantes por km²) y CT relativamente bajos (menos de 200 dólares por tonelada). Ejemplos representativos de este grupo incluyen Pastaza, Zamora Chinchipe y Napo, caracterizadas por su predominante naturaleza rural y bajo volumen de generación de residuos. Estos costos unitarios bajos podrían explicarse por un adecuado aprovechamiento de la infraestructura disponible o, en algunos casos, por la implementación de buenas prácticas administrativas y una gestión optimizada de la GIDS. Dado su desempeño positivo, este grupo de provincias debería ser objeto de estudio, ya que podría ofrecer oportunidades de aprendizaje sobre estrategias exitosas que podrían replicarse en otras regiones.

El *clusters* de color verde incluye provincias con densidad poblacional igualmente baja (menor a 150 habitantes por km²), pero con CT moderados (entre 150 y 300 dólares por tonelada). En este grupo están los casos de Imbabura, Cañar y Chimborazo, que presentan una combinación de zonas urbanas y rurales, lo que podría reflejar un balance entre los costos derivados de áreas agrícolas y de servicios urbanos en desarrollo. Este perfil sugiere que estas provincias cuentan con infraestructuras mixtas, que soportan tanto dinámicas rurales como urbanas en expansión.

El *clusters* de color azul agrupa provincias con baja densidad poblacional (inferior a 150 habitantes por km²) y CT elevados (superiores a 300 dólares por tonelada). Entre las provincias destacadas en este grupo se encuentran Galápagos, Sucumbíos y Orellana, donde el aislamiento geográfico, los desafíos logísticos y la

dependencia de sectores económicos específicos (como el turismo en Galápagos o la extracción de recursos en Sucumbíos) aumentan significativamente los costos de gestión de residuos. Además, la falta de infraestructura adecuada y la limitada capacidad de planificación agravan estos problemas, lo que hace que estas provincias requieran estrategias ajustadas a sus necesidades particulares para mejorar su eficiencia en costos unitarios.

El *clusters* de color amarillo está compuesto por provincias con densidad poblacional más alta (entre 150 y 350 habitantes por km²) y CT moderados o bajos (entre 150 y 300 dólares por tonelada). Las provincias más representativas de este grupo son Pichincha y Guayas, donde la alta generación de residuos se gestiona eficientemente gracias a la optimización de costos mediante economías de escala. En estas provincias, la mayor densidad poblacional permite distribuir los costos operativos entre un mayor volumen de residuos, evitando costos elevados y manteniendo los valores dentro de rangos más controlados.

El gráfico evidencia que las provincias con mayor densidad poblacional (*clusters* de color amarillo) pueden optimizar mejor sus costos gracias a las economías de escala, reduciendo significativamente el costo unitario de la GIDS. En contraste, las provincias con baja densidad poblacional presentan una mayor variabilidad en costos, abarcando desde costos unitarios bajos a elevados. Esto sugiere la existencia de diversas realidades y estrategias de gestión, donde algunas provincias logran costos bajos debido a su eficiencia operativa que aprovecha las características de su entorno, otras debido al aprovechamiento de economías de escala, mientras que otras enfrentan altos costos por limitaciones estructurales de orden geográfico y organizacional.

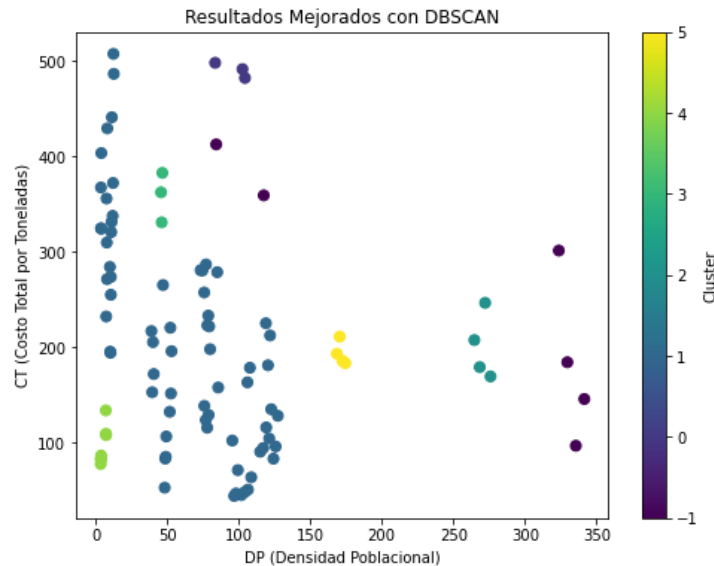
Las provincias del *clusters* de color azul, con baja densidad y altos costos, evidencian la necesidad de implementar estrategias que mejoren la eficiencia en la gestión de residuos y optimicen la infraestructura existente. En este contexto, resulta clave explorar tecnologías adaptadas a las condiciones específicas de estas provincias para reducir costos sin comprometer la sostenibilidad del sistema. Por otro lado, las provincias del *clusters* de color púrpura muestran buenos resultados en la gestión de residuos a pesar de su baja densidad poblacional, lo que sugiere la existencia de buenas prácticas que podrían ser estudiadas y replicadas en otras provincias con condiciones similares.

Este análisis resalta la importancia de adaptar las políticas públicas a las particularidades de cada grupo de provincias. Para las provincias del *clusters* de color púrpura, se recomienda priorizar inversiones en infraestructura básica, asegurando que los sistemas de gestión de residuos sean eficientes sin generar costos excesivos. En las provincias del *clusters* de color verde, es necesario implementar estrategias combinadas que atiendan tanto las dinámicas rurales como urbanas, optimizando la integración de infraestructuras mixtas. En el caso de las provincias del *clusters* de color azul, se deben desarrollar soluciones sostenibles y eficientes, enfocadas en la reducción de costos logísticos, el fortalecimiento de la infraestructura y la exploración de tecnologías adaptadas al medio. Posteriormente, para las provincias del *clusters* de color amarillo, es fundamental continuar potenciando el aprovechamiento de economías de escala, promoviendo la innovación en modelos de gestión de residuos que mantengan costos bajos sin comprometer la sostenibilidad para lo cual podrían aportar las estrategias propuestas por la economía circular.

En conclusión, el análisis realizado con K-Means permite analizar las provincias ecuatorianas según su densidad poblacional y sus costos unitarios de gestión de residuos, aportando información para comprender la diversidad en la práctica de la gestión de residuos en las provincias e identificando criterios para desarrollar estrategias diferenciadas y sostenibles en la práctica de la GIDS.

El gráfico 6, generado mediante el algoritmo DBSCAN, analiza la relación entre el costo total por tonelada (CT) de la GIDS y la densidad poblacional (DP) en las provincias ecuatorianas, permitiendo una segmentación más detallada y la detección de puntos atípicos clasificados como ruido. A diferencia del análisis previo realizado con K-Means, este enfoque identifica seis *clusters* más complejos, proporcionando una mayor profundidad en la caracterización de las provincias y permitiendo un análisis más preciso de sus diferencias estructurales.

Gráfico 6 - Resultados mejorados con DBSCAN para CT y DP.



Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

El estudio revela una diferenciación significativa en la relación entre CT y DP, destacando patrones específicos dentro de los distintos *clusters* y en el grupo clasificado como ruido. Dentro de este grupo (representado en color púrpura), se encuentran provincias con combinaciones atípicas de características. Algunas de estas presentan baja densidad poblacional (menor a 150 habitantes por km²) y costos elevados en la GIDS, como Galápagos y Sucumbíos. En estos casos, factores como el aislamiento geográfico, la falta de infraestructura y las particularidades económicas (turismo en Galápagos y extracción de recursos en Sucumbíos) explican sus altos costos operativos. Dada su naturaleza distintiva, estas provincias requieren soluciones personalizadas, con estrategias innovadoras que permitan optimizar el uso de recursos y reducir costos sin comprometer la sostenibilidad.

Por otro lado, dentro del mismo grupo de ruido, se incluyen provincias con alta densidad poblacional (mayor a 150 habitantes por km²) y costos variables que van de bajos a medios, tales como Pichincha, El Oro y Chimborazo. La dispersión en los costos dentro de este segmento sugiere que las economías de escala no se están aprovechando de manera uniforme en todas las provincias densamente pobladas. Esto indica la necesidad de un análisis más detallado de cada caso, para identificar buenas prácticas que puedan replicarse, así como desafíos específicos que deben abordarse para optimizar la eficiencia en la GIDS.

Dentro de los *clusters* definidos, el grupo representado en color azul incluye provincias con densidad poblacional baja a moderada (menores a 150 habitantes por km²) y costos de gestión que varían entre bajos, intermedios y altos. Ejemplos de este grupo son Chimborazo, Loja y El Oro, donde la combinación de dinámicas urbanas y rurales influye en los costos operativos. Estas provincias deben gestionar volúmenes moderados de residuos,

manteniendo a la vez costos controlados, lo que las posiciona como casos interesantes para analizar estrategias de eficiencia. En contraste, Galápagos y Sucumbíos dentro de este mismo grupo confirman su condición atípica, con baja densidad y costos elevados, reiterando su necesidad de desarrollar estrategias específicas y tecnologías adaptadas a su contexto.

El *clusters* representado en color verde claro agrupa provincias con densidad poblacional extremadamente baja (igual o menor a 50 habitantes por km²) y costos de gestión relativamente bajos (inferiores a 150 dólares por tonelada). Ejemplos como Pastaza y Zamora Chinchipe reflejan una estructura predominantemente rural, con baja generación de residuos y menor presión sobre los sistemas de gestión de la GIDS. Este perfil ofrece una oportunidad para implementar soluciones de bajo costo y sostenibles, como el compostaje o la promoción de programas de reducción de residuos en origen, permitiendo optimizar los recursos sin la necesidad de grandes inversiones en infraestructura.

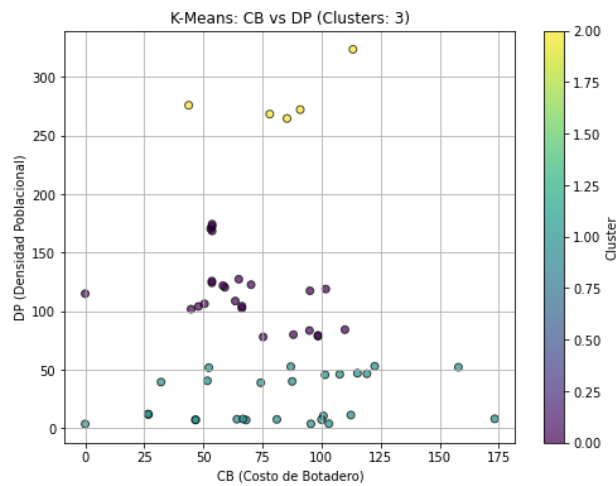
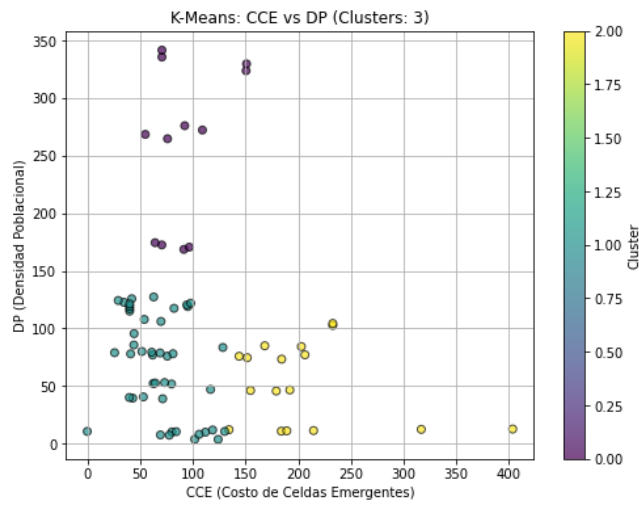
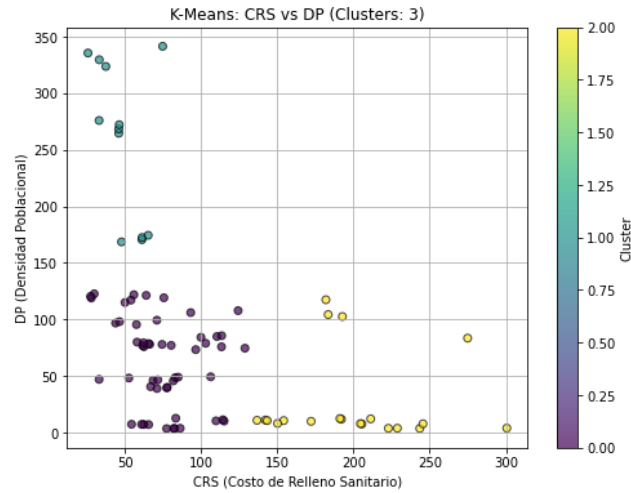
En contraste, el *clusters* representado en color amarillo incluye provincias con densidad poblacional intermedia (agrupados entre 150 y 200 habitantes por km²) y costos moderados (de alrededor de los 200 dólares por tonelada). Provincias como Pichincha y Guayas forman parte de este grupo, caracterizadas por una combinación de actividades rurales y urbanas, lo que requiere estrategias específicas para equilibrar el desarrollo económico con la sostenibilidad ambiental. La gestión eficiente de residuos en estas provincias requiere inversiones en infraestructuras intermedias y la implementación de programas de optimización de recursos.

El análisis realizado con DBSCAN no solo permite una segmentación más precisa, sino que también enfatiza la importancia del grupo de ruido como una categoría clave para comprender las diferencias estructurales entre provincias. La identificación de estos casos atípicos resalta la necesidad de formular políticas públicas diferenciadas, adaptadas a las condiciones particulares de cada grupo.

Las provincias con baja densidad poblacional requieren estrategias sostenibles y de bajo costo, mientras que aquellas clasificadas dentro del grupo de ruido requieren soluciones altamente innovadoras y adaptadas a sus características particulares. El desafío radica en optimizar la relación entre costos y eficiencia en la GIDS, asegurando que los modelos de gestión de residuos sean económicamente viables y ambientalmente sostenibles para cada contexto provincial.

El análisis de los gráficos 7, 8 y 9, generados mediante el algoritmo K-Means, evidencia la segmentación de las provincias ecuatorianas en tres *clusters* diferenciados según los costos unitarios de CRS, CCE y CB, en función de la densidad poblacional (DP). Esta segmentación permite observar cómo los diferentes sistemas de gestión de residuos sólidos aprovechan o no las economías de escala y qué factores influyen en la variabilidad de costos según el contexto territorial.

Gráfico 7,8 y 9 en K-means con CRS, CCE, CB y DP (3 Clusters).



Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

El gráfico 7, muestra que los rellenos sanitarios (CRS) logran aprovechar eficientemente las economías de escala, especialmente en áreas densamente pobladas, donde los costos unitarios de los CRS disminuyen significativamente al procesar mayores volúmenes de residuos. Esto maximiza su eficiencia operativa, lo que los convierte en la opción más costo-efectiva en contextos urbanos. Sin embargo, este efecto es menos pronunciado en las celdas emergentes y prácticamente inexistente en los botaderos, lo que indica su limitada capacidad para reducir costos.

A medida que la densidad poblacional disminuye, la ventaja de las economías de escala se reduce en todos los sistemas de gestión, siendo los botaderos los más afectados, ya que sus costos se mantienen altos independientemente del volumen de residuos procesado. Esto los posiciona como el sistema menos eficiente, incluso en regiones con baja generación de residuos. Además, la ausencia de observaciones en la zona superior derecha del gráfico indica que los rellenos sanitarios mantienen costos bajos en áreas urbanas altamente pobladas, mientras que la falta de puntos en la esquina inferior izquierda sugiere que no son implementados en zonas rurales con baja densidad poblacional, posiblemente debido a limitaciones de infraestructura o volúmenes insuficientes de generación de residuos.

El gráfico 8, que analiza las celdas emergentes (CCE) en relación con la densidad poblacional, muestra que estas estructuras responden a variaciones en la población, aunque su capacidad para aprovechar economías de escala es limitada en comparación con los rellenos sanitarios. Mientras que las CCE logran reducir costos en áreas con densidad poblacional moderada a alta, esta reducción no es tan eficiente como la de los CRS, que presentan una mayor capacidad para optimizar costos en entornos urbanos.

Por otro lado, tanto las celdas emergentes como los botaderos presentan costos que no disminuyen de manera proporcional con el aumento de la densidad poblacional. En particular, los botaderos mantienen costos elevados incluso en territorios densamente poblados, lo que evidencia su ineficiencia operativa. Esta situación se agrava en regiones de baja densidad, donde las limitaciones de infraestructura y logística dificultan cualquier reducción significativa de costos. Además, la ausencia de puntos en la parte superior derecha del gráfico indica que las CCE no son una opción viable en áreas urbanas densas, mientras que la falta de observaciones en la esquina inferior izquierda sugiere que, en zonas rurales con densidades extremadamente bajas, las celdas emergentes son poco utilizadas, posiblemente porque se prefieren sistemas más simples, como los botaderos.

El gráfico 9, que analiza los botaderos (CB) en función de la densidad poblacional, resalta que este sistema es el más afectado por las limitaciones de infraestructura y densidad poblacional. A diferencia de los rellenos sanitarios, los botaderos no logran reducir significativamente sus costos a medida que aumenta la densidad poblacional, lo que reafirma su ineficiencia en el aprovechamiento de economías de escala. Esto los posiciona como el sistema menos costo-eficiente dentro de la GIDS.

Las celdas emergentes, en cambio, muestran una leve mejora en costos en áreas con densidad poblacional media, aunque sin alcanzar los niveles de eficiencia de los rellenos sanitarios, cuyos costos son más bajos y mejor controlados gracias a su capacidad de procesar grandes volúmenes de residuos de manera efectiva.

Los espacios vacíos en los gráficos refuerzan estas observaciones. En la parte inferior derecha del gráfico, la ausencia de puntos indica que los botaderos no logran costos bajos, ni siquiera en contextos de alta densidad poblacional y alto volumen de residuos, lo que pone en evidencia sus deficiencias estructurales.

El análisis comparativo de las distintas técnicas de gestión de residuos sólidos sugiere que los rellenos sanitarios son la opción más eficiente, ya que logran una reducción significativa de costos en provincias con alta densidad

poblacional. Este resultado es consistente con el principio de economías de escala, donde el procesamiento de mayores volúmenes de residuos permite distribuir los costos operativos de manera más eficiente. En consecuencia, los CRS se consolidan como la alternativa más efectiva para contextos urbanos.

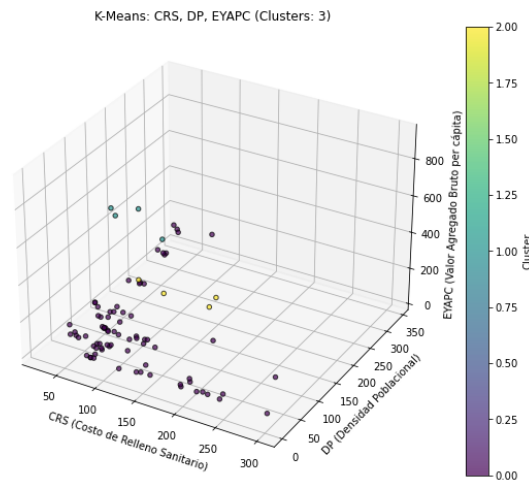
En comparación, las celdas emergentes presentan una capacidad limitada para beneficiarse de economías de escala, ya que su eficiencia depende de factores logísticos y estructurales. Aunque en zonas de densidad poblacional moderada pueden lograr cierta reducción de costos, su desempeño es inferior al de los rellenos sanitarios, lo que indica que no son una alternativa óptima para una gestión sostenible a largo plazo.

Por otro lado, los botaderos presentan los mayores costos operativos en todos los escenarios, incluso en provincias densamente pobladas, debido a su baja capacidad para gestionar grandes volúmenes de residuos. Esta ineficiencia subraya la necesidad de priorizar sistemas de gestión basados en tecnologías avanzadas, como los rellenos sanitarios, que ofrecen una mejor relación costo-beneficio y un menor impacto ambiental.

Finalmente, los espacios vacíos en los gráficos refuerzan estas observaciones, mostrando que los rellenos sanitarios son más efectivos en áreas de alta densidad poblacional, mientras que las celdas emergentes y los botaderos enfrentan restricciones en su operación tanto en contextos urbanos como rurales. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de promover inversiones estratégicas en infraestructura de rellenos sanitarios, garantizando así un sistema de gestión de residuos más eficiente y sostenible en Ecuador.

El gráfico 10 es tridimensional y está generado mediante el algoritmo K-Means para analizar la relación entre el CRS, la DP y el EYAPC en las provincias ecuatorianas, segmentándolas en tres *clusters*. En este caso se añade una dimensión (variable) más al análisis por lo que se redujo un *clusters* para mantener la parsimonia del modelo, manteniendo un nivel de inercia aceptable como se desprende del análisis de método de codo.

Gráfico 8 - K-Means con CRS, DP y EYAPC (3 Clusters).



Fuente: AME-INEC, BCE y IGM, 2017-2020. **Elaboración:** Josselyn Sánchez.

El *clusters* de color púrpura agrupa provincias con grandes diferencias tanto en densidad poblacional como en los costos por tonelada del relleno sanitario (CRS), que tienen en común un bajo valor agregado per cápita en los suministros de agua y electricidad (EYAPC). De igual manera, el *clusters* de color amarillo agrupa provincias con un bajo EYAPC, pero en este caso se trata de provincias más homogéneas en términos de densidad

población (DP) y costos por tonelada de relleno sanitario (CRS). Estas provincias del grupo amarillo tienen mayor capacidad para aprovechar las economías de escala que se desprenden de su densidad poblacional relativamente alta (en torno a los 300 habitantes por km²), ya que presentan costos unitarios de gestión del relleno sanitario medios y bajos. La mayor densidad poblacional contribuye a una logística que equilibra los costos asociados con regiones densamente pobladas y las dificultades operativas de áreas con baja densidad. Este *clusters* puede servir como referencia para desarrollar prácticas que optimicen recursos y costos en la GIDS aprovechando economías de escala. Las provincias de este grupo de color amarillo son: Pichincha y Guayas, que combinan en su territorio la coexistencia de grandes zonas urbanas densamente pobladas y extensas zonas rurales de mucho menor densidad poblacional.

Finalmente, el *clusters* de color cian se distingue por tratarse de provincias con un alto valor agregado bruto per cápita de los suministros de agua y electricidad (EYAPC) y una densidad poblacional considerable (mayor a 250 habitantes por km²). Esta mayor capacidad en la infraestructura y la implementación de servicios de electricidad y agua potable (per cápita), permiten aprovechar las economías de escala en la GIDS incluso de mejor manera que en el grupo de color amarillo, como se puede evidenciar en el Gráfico 10. Estas provincias logran reducir los costos unitarios mediante una mayor eficiencia en la gestión de recursos, resultado de niveles más altos de actividad económica en los suministros de agua y electricidad per cápita, y una relativamente alta densidad poblacional. Lo anterior se puede evidenciar porque este grupo de color cian evidencia los costos unitarios más bajos de todos, lo que posiciona a las provincias de este *clusters* como ejemplos de estrategias efectivas para la GIDS, basadas en el aprovechamiento de las economías de escala y en la ventaja que les da mantener una mayor capacidad en la infraestructura y la implementación de servicios de electricidad y agua potable, por habitante. Por lo que se evidencia que desarrollar infraestructura y capacidades en la provisión de estos servicios puede ayudar a lograr sinergias para reducir los costos unitarios de la gestión de rellenos sanitarios (CRS). Las provincias de este grupo de color cian son: Azuay, Chimborazo y El Oro.

Conclusiones y Recomendaciones

El análisis descriptivo de los costos de la GIDS en las provincias del Ecuador durante el período 2017-2020 permite identificar las disparidades económicas y logísticas que afectan la sostenibilidad y eficiencia en la disposición de residuos. A través de la estadística descriptiva y el uso de técnicas de *Machine Learning* (ML), como K-Means y DBSCAN, se analizaron variables clave, entre ellas la densidad poblacional (DP) y el valor agregado bruto per cápita en el suministro de agua y electricidad (EYAPC). Este enfoque permitió obtener una visión integral de las dinámicas territoriales que influyen en los costos unitarios de la GIDS, facilitando la identificación de patrones estructurales en la gestión de residuos sólidos.

Inicialmente, el análisis descriptivo evidenció diferencias significativas entre los sistemas de disposición final. Los rellenos sanitarios (CRS) presentaron una tendencia decreciente en costos por tonelada, lo que sugiere una mayor eficiencia operativa a lo largo del tiempo. En contraste, las celdas emergentes (CCE) y los botaderos (CB) mostraron una mayor variabilidad y un incremento en costos, lo que pone de manifiesto sus limitaciones como alternativas sostenibles de disposición final. El uso de algoritmos de *clustering* permitió segmentar las provincias en grupos homogéneos, identificando patrones asociados a la densidad poblacional y los costos unitarios de la GIDS. Esto fortaleció la comprensión de las diferencias territoriales en la gestión de residuos y permitió analizar el impacto de distintos factores en los costos operativos.

El análisis basado en K-Means y DBSCAN destacó que provincias con alta densidad poblacional, como Pichincha y Guayas, logran optimizar costos mediante el aprovechamiento de economías de escala. En

contraste, provincias con baja densidad, como Galápagos y Sucumbíos, enfrentan costos significativamente más altos debido a restricciones logísticas, limitaciones en infraestructura y dificultades para acceder a servicios esenciales, como el suministro de agua y electricidad. Estas condiciones evidencian la importancia de adaptar las estrategias de gestión de residuos a la realidad de cada territorio, considerando sus características geográficas y demográficas.

Entre 2017 y 2020, el volumen de residuos generados en Ecuador ha seguido una tendencia creciente, mientras que los costos unitarios han mostrado una evolución diferenciada. Durante este período, los costos unitarios de los rellenos sanitarios (CRS) experimentaron una reducción acumulada del 16.07%, en contraste con los incrementos del 14.14% en los costos unitarios de las celdas emergentes (CCE) y del 31.34% en los costos unitarios de botaderos (CB). Estos resultados reflejan diferencias significativas en la eficiencia de los sistemas de disposición final y resaltan la importancia de promover alternativas más sostenibles. En este sentido, los rellenos sanitarios no solo representan la mejor opción desde una perspectiva ambiental y de salud pública, sino que, además, son la única tecnología en la GIDS que demuestra costos unitarios decrecientes.

Por lo tanto, se recomienda fortalecer la implementación de rellenos sanitarios, asegurando su actualización y ampliación mediante políticas que garanticen su sostenibilidad a largo plazo. Asimismo, se debe reducir progresivamente el uso de celdas emergentes, promoviendo su sustitución por alternativas más eficientes y permanentes. En cuanto a los botaderos, es crucial implementar estrategias para eliminar gradualmente su uso, optimizando la gestión de residuos e impulsando soluciones más sostenibles y con menor impacto ambiental.

El análisis de los costos unitarios promedio de la GIDS en Ecuador durante el período 2017-2020 reveló una alta heterogeneidad entre provincias, atribuida a factores como la densidad poblacional, las condiciones geográficas y la capacidad de infraestructura. Mientras que los costos unitarios de los rellenos sanitarios (CRS) lograron reducciones en costos unitarios en provincias con alta densidad poblacional, como Pichincha y Guayas, los CCE y los CB mostraron una mayor volatilidad en sus costos, particularmente en provincias como Sucumbíos y Galápagos, donde las condiciones logísticas representan un desafío importante. Por ello, se recomienda fortalecer el uso de rellenos sanitarios en provincias donde las economías de escala puedan ser aprovechadas y, al mismo tiempo, explorar alternativas de bajo impacto ambiental en regiones con baja densidad poblacional.

El estudio de la dispersión de costos por tonelada reflejó una tendencia hacia la convergencia en los rellenos sanitarios (CRS), con menor volatilidad y costos más homogéneos en 2020 en comparación con 2017. En cambio, los CCE y CB han experimentado mayor volatilidad, sin mostrar señales de estabilización. En particular, en 2020, los botaderos exhibieron una dispersión aún mayor, lo que confirma su ineficiencia operativa y su falta de sostenibilidad a largo plazo. Estos hallazgos resaltan la importancia de priorizar los rellenos sanitarios como el principal componente de la GIDS, promoviendo su implementación de manera uniforme a nivel nacional.

El uso del algoritmo K-Means con cuatro *clusters* permitió evidenciar que las economías de escala desempeñan un papel clave en la reducción de costos unitarios. Las provincias con mayor densidad poblacional registran costos unitarios más bajos, mientras que aquellas con baja densidad presentan variaciones más amplias, lo que sugiere la necesidad de estrategias diferenciadas. En este sentido, en referencia al gráfico No. 5 es crucial que las provincias del *clusters* de color amarillo continúen optimizando sus costos a través de mejoras en la infraestructura y la eficiencia operativa. En las provincias púrpuras y verdes, se deben desarrollar planes de inversión en infraestructura básica, mientras que en las provincias del *clusters* de color azul, con costos elevados y baja densidad poblacional, se requiere la implementación de tecnologías especializadas para reducir costos unitarios y mejorar la eficiencia operativa.

El método DBSCAN permitió un análisis más profundo al identificar seis *clusters* principales y un grupo de ruido, lo que ayudó a segmentar a las provincias en función de sus costos unitarios y densidad poblacional. En el grupo de ruido se encuentran provincias como Galápagos y Sucumbíos, que registran costos elevados debido a desafíos logísticos y restricciones de infraestructura. Estos resultados subrayan la importancia de diseñar políticas diferenciadas que respondan a las necesidades específicas de cada *clusters*.

Los resultados de DBSCAN también evidenciaron que las provincias rurales y de baja densidad requieren estrategias sostenibles y de bajo costo, como el compostaje y la reducción de residuos en origen. En el caso de las provincias intermedias, es fundamental impulsar inversiones en infraestructura que equilibren desarrollo económico y sostenibilidad ambiental. Para las provincias del grupo de ruido, es esencial implementar soluciones innovadoras adaptadas a sus condiciones particulares, optimizando la gestión de residuos y reduciendo costos operativos.

El análisis tridimensional basado en K-Means mostró que las provincias con alta densidad poblacional y mayor desarrollo en infraestructura y capacidad de provisión de servicios de agua y electricidad lograron los costos unitarios más bajos, mientras que aquellas con infraestructura y capacidad menos desarrollada enfrentaron mayores costos operativos. Esto resalta la importancia de fortalecer la infraestructura complementaria, como el suministro eficiente de agua y electricidad, para mejorar la sostenibilidad económica de la GIDS.

Finalmente, el estudio demuestra la necesidad de diseñar políticas públicas diferenciadas según las características de cada *clusters* provincial. En referencia al gráfico No. 10 las provincias del *clusters* de color amarillo pueden servir como modelos de eficiencia operativa por su aprovechamiento de economías de escala, mientras que las del *clusters* cian representan los casos más exitosos en términos de reducción de costos unitarios. Esta segmentación permite identificar casos para profundizar estudios que permitan formular estrategias más efectivas y optimizar el uso de recursos en la GIDS en Ecuador, promoviendo políticas de largo plazo y fomentando futuras investigaciones con metodologías más avanzadas y objetivos de mayor alcance.

Bibliografía

Aguirre López, J., & Ortega Castro, J. (2022). Costos operativos en los sistemas de recolección de residuos sólidos en los cantones de Ecuador. *FIPCAEC*, 412-419. doi:<https://doi.org/10.23857/fipcaec.v7i1.529>

Agulló, V., González, G., & Abellán, C. (2011). Percepción social sobre la gestión de residuos urbanos: el caso del municipio de Puçol. *14*, 95–106. doi:https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2011.v14.37294

Alcocer, P., Knudsen, J., Marrero, F., & Miranda, B. (2020). Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo, Ecuador. (U. d. Zulia, Ed.) *Revista de Ciencias Sociales*, 26(4), 328-348. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28065077025>

Banco Mundial. (2018). *Waste Management: An Integral Part of the Circular Economy*. Washington: Banco Mundial. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>

Bernache Pérez, G. (Junio de 2015). La gestión de los residuos sólidos: un reto para los gobiernos locales. (E. C. Sur, Ed.) *Sociedad y Ambiente*, 1(7), 72-98. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4557/455744912004.pdf>

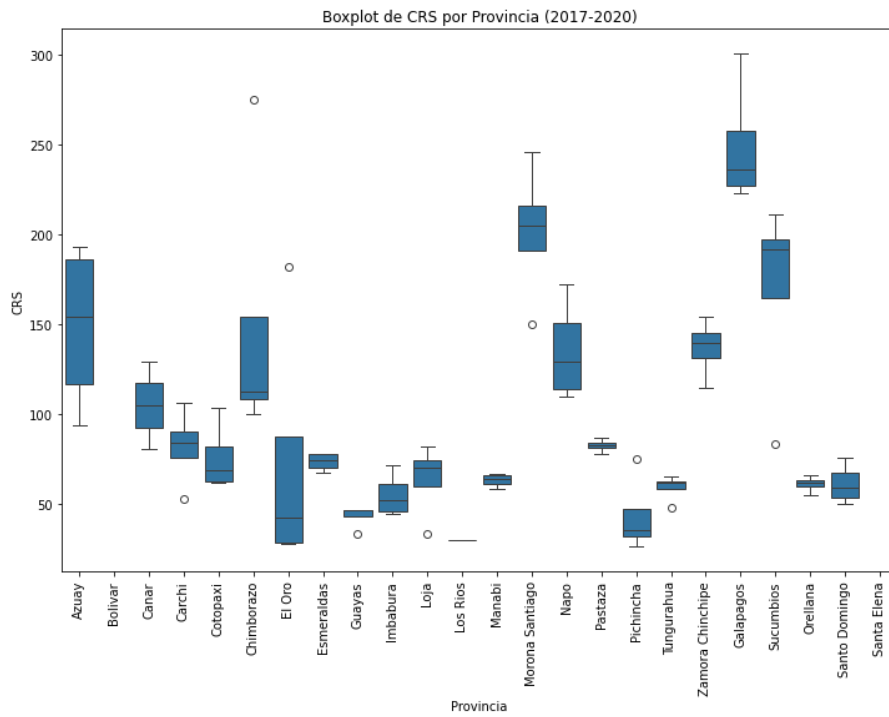
Cárdenas, P., Prado, D., & Iglesias, B. (2021). Implementación del algoritmo K-means para clusterización de señales EEG durante la aplicación de una prueba Stroop. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 33(2). doi:DOI:10.37815/rte.v33n2.847

- Coacalla Castillo, C., Pareja Cabrera, J., & Suarez Orellana, A. (2020). Indicadores de gestión en el manejo integral de residuos sólidos de la municipalidad de Aymaraes. 22(3). Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=637869117001>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Obtenido de [chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf](https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf)
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition*. Obtenido de https://kidv.nl/media/rapportages/towards_a_circular_economy.pdf?1.2.1
- Ester, M., Kriegel, H., Sander, J., & Xu, X. (1996). A Density Based Algorithm for Discovering Density Varied Clusters in Large Spatial Databases. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 226–231. doi:<http://dx.doi.org/10.5120/739-1038>
- Ferdiansyah, F., Nugraha, R., Sofian, R., Purwanto, H., Saepudin, D., & Andriansyah, E. (2024). Implementation of K-Means and DBSCAN algorithms: A bibliometric review. En A. Press (Ed.), *Widyatama International Conference on Engineering 2024*. Bandung, Indonesia: Advances in Engineering Research. Obtenido de <https://www.atlantis-press.com/proceedings/wicoeng-24/126007243>
- Geyer, R., Jambeck, J., & Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. Obtenido de <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 11-34.
- Global Methane Initiative. (2010). *Fundamentos Operaciones en los Rellenos Sanitarios. Fundamentos Básicos de la Operaciones en Rellenos Sanitarios* (págs. 1-39). Washington D.C.: Global Methane Initiative. Obtenido de https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20100602_law_3.pdf
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). *Data Mining: Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann. Burnaby, British Columbia: Simon Fraser University. Obtenido de <https://homes.di.unimi.it/ceselli/IM/2012-13/slides/02-KnowYourData.pdf>
- Hartigan, J., & Wong, M. (1979). Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(1), 100-108. doi:<https://doi.org/10.2307/2346830>
- Hernández, V. (2014). *Costos de operación como estrategia para la recolección de residuos sólidos en la Municipalidad Distrital de San Antonio de Huarochirí*. Tesis de Grado, Lima. Obtenido de https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/1910/hernandez_cvm.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Hoorweg, D., & Bhada, P. (2012). *What a waste: a global review of solid waste management*. Urban Dev Ser Knowl Pap.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2019). *Estadísticas de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales*. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales/>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (Diciembre de 2022). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales: Residuos Sólidos*. (INEC, Ed.) Recuperado el 11 de Marzo de 2024, de Gestión de Residuos Sólidos: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2022/Residuos_Solidos/Presentacion_GIRS_2022vFINAL.pdf
- International Solid Waste Association. (2020). *The Global Waste Management Outlook: Challenges and Opportunities in the Waste Sector*. Obtenido de https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44939/global_waste_management_outlook_2024.pdf?sequence=3
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., & Taylor, J. (2023). *An Introduction to Statistical Learning, With Applications in Python*. Estados Unidos: Springer Texts in Statistics. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-031-38747-0>

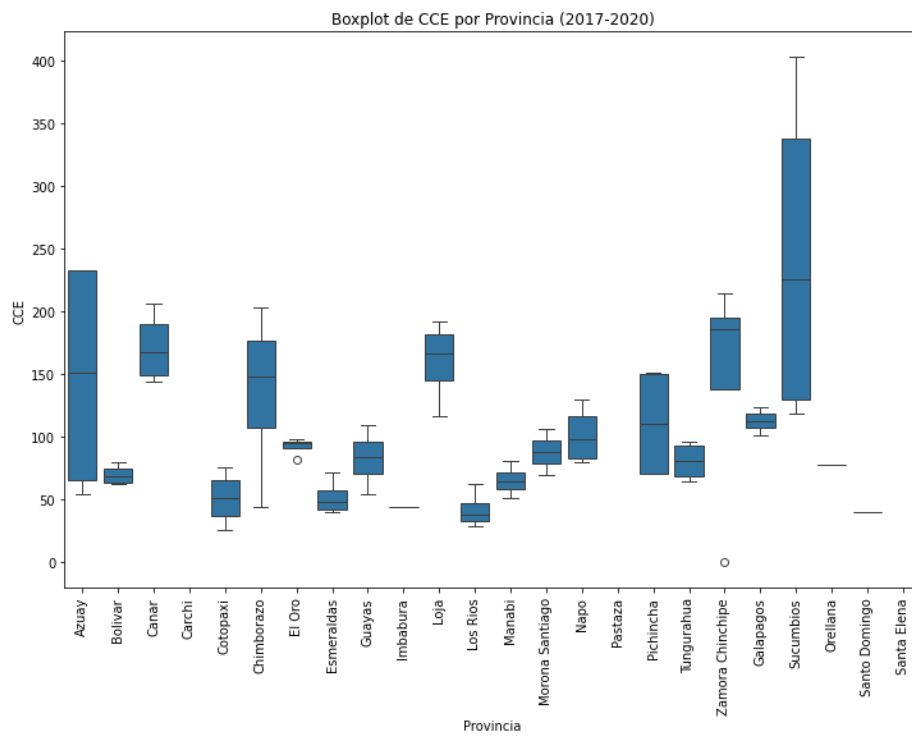
- Kaza, S., Yao, L., Bhada, P., & Van, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, DC: The World Bank.
- MacQueen, J. (1967). In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. *Some methods for classification and analysis of multivariate observations*, 281-297. Obtenido de file:///C:/Users/andre/Downloads/1200512992.pdf
- Management Solutions. (2020). *Waste Management Using Machine Learning and Deep Learning Algorithms* (Vol. 6). Kuala Lumpur, Malasia: International Journal on Perceptive and Cognitive Computing. Obtenido de file:///C:/Users/andre/Desktop/ARTICULO%20JOSS%202024/ARTICULOS%20RELACIONADOS/ART.1/PREGUNTA%203/machine-learning.pdf
- Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2017). *Proyecto de Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva (GRECI)*. (GRECI, Ed.) Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/2.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2020). *Informe Nacional de Gestión de Residuos Sólidos*. Quito: Gobierno de Ecuador. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales-2021/>
- Ministerio del Ambiente, A. y. (2023). *Gestión Integral de Desechos Sólidos PNGIDS*. Obtenido de Diagnóstico de la Cadena de Gestión Integral de Desechos Sólidos-Reciclaje: <https://www.vicepresidencia.gob.ec/wp-content/uploads/2015/08/Resumen-Cadena-de-Gestion-de-Residuos-S%C3%B3lidos.pdf>
- Ministerio del Ambiente, A. y. (2023). *Proyecto de Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva*. Recuperado el 16 de 11 de 2024, de Generación de residuos y desechos sólidos no peligrosos en el Ecuador y su proyección al año 2030: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/1.pdf>
- Naciones Unidas. (2018). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Obtenido de <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2018-es.pdf>
- Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía General para la Gestión de Residuos Sólidos Municipales*. (CEPAL ed.). Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a5f80abc-8063-4e19-b871-e954f1db5bf6/content>
- Sánchez, M. (2016). Puntos centrales de la relación entre el desarrollo sostenible y la gestión integral de residuos sólidos domiciliarios. *Revista Centroamericana de Administración Pública*, 228-241. Obtenido de file:///C:/Users/andre/Downloads/52-Texto%20del%20art%C3%ADculo-244-1-10-20210729.pdf
- Subhasish, D., Lee, S. H., Pawan, K., Ki-Hyun, K., Lee, S., & Sundar Bhattacharya, S. (2019). Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 228, 658-678. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.323>
- Tchobanoglous, F., & Kreith, F. (2002). *Handbook of solid waste management*. McGraw-Hill. Obtenido de <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/ec018d7f657becb6/23dbdd93a513a0345104a26b6f267365d35291352ce99ea991f83fdcf99cf84/book-summary.pdf>
- Umargono, E., & Endro, J. (2020). Optimización de agrupamiento de K-medias mediante el método del codo y determinación temprana del centroide basada en la fórmula de la media y la mediana. *Conferencia: 2do Seminario Internacional de Ciencia y Tecnología (ISSTEC 2019)*, 1(122). doi:DOI: 10.2991/assehr.k.201010.019

Anexos

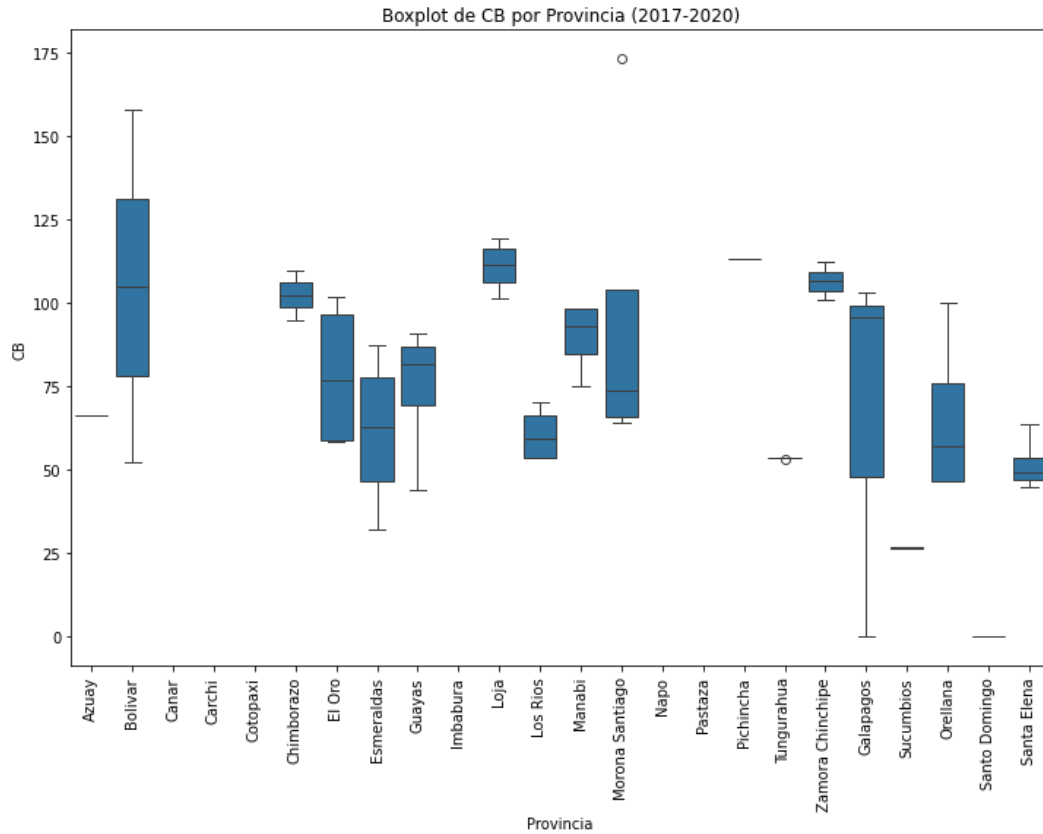
Anexo 1: Gráfico de Boxplot de CRS por Provincias



Anexo 2: Gráfico de Boxplot de CCE por Provincias



Anexo 3: Gráfico de Boxplot de CB por Provincias



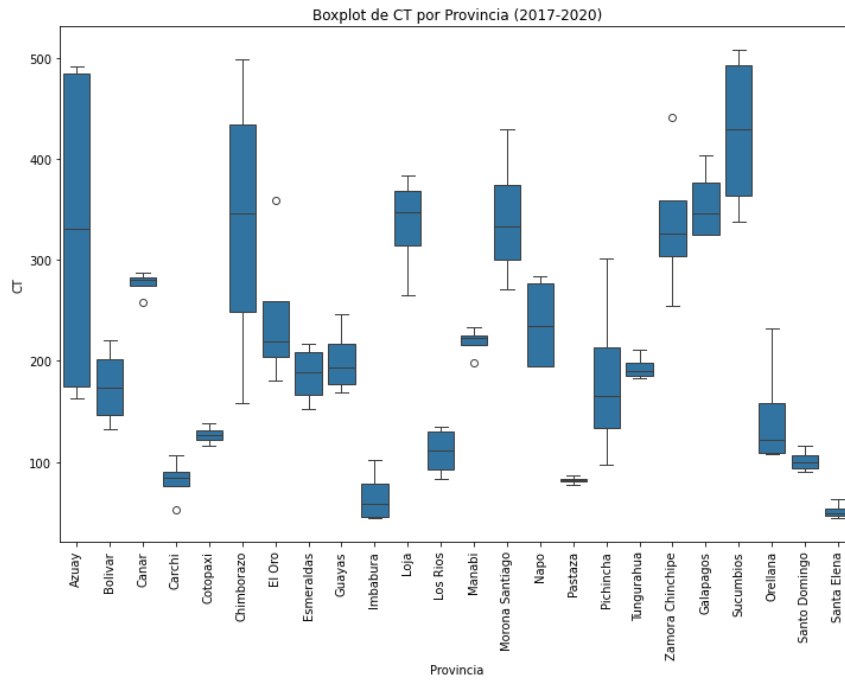
Anexo 4: Tabla del Costo Total (CT)

| | ANIO | PROV | CRS | CCE | CB | CT |
|----|------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| 0 | 2017 | Azuay | 192.740612 | 232.807167 | 66.275033 | 491.822813 |
| 1 | 2017 | Bolivar | NaN | 79.944208 | 52.250476 | 132.194685 |
| 2 | 2017 | Canar | 96.471848 | 184.321098 | NaN | 280.792947 |
| 3 | 2017 | Carchi | 52.647191 | NaN | NaN | 52.647191 |
| 4 | 2017 | Cotopaxi | 62.538645 | 75.862767 | NaN | 138.401412 |
| .. | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 91 | 2020 | Galapagos | 300.615867 | NaN | 103.095722 | 403.711589 |
| 92 | 2020 | Sucumbios | 83.435684 | 403.395879 | NaN | 486.831563 |
| 93 | 2020 | Orellana | 54.361111 | 77.777778 | 100.048622 | 232.187511 |
| 94 | 2020 | Santo Domingo | 63.993614 | 40.206417 | NaN | 104.200030 |
| 95 | 2020 | Santa Elena | NaN | NaN | 63.514922 | 63.514922 |

[96 rows x 6 columns]

La suma total de CT para todos los años y provincias es: 20561.60999428

Anexo 5: Gráfico de Boxplot de CT por Provincias



Anexo 6: Tabla de Desviación estándar de variables total en el periodo 2017-2020

| | |
|------|---------------|
| CRS | 62.926358 |
| CCE | 69.538634 |
| CB | 33.215844 |
| HAB | 983718.548739 |
| KM2 | 7551.529349 |
| ESCO | 1.918164 |
| ALFA | 4.521280 |
| EYA | 122768.258368 |

Anexo 7: Tabla de Desviación estándar 2017-2020

-> anio = 2017

| Variable | Obs | Mean | Std. dev. | Min | Max |
|----------|-----|----------|-----------|----------|----------|
| anio | 24 | 2017 | 0 | 2017 | 2017 |
| prov | 0 | | | | |
| crs | 22 | 111.805 | 74.83684 | 29.85111 | 274.9068 |
| cce | 20 | 98.89007 | 56.39036 | 0 | 232.8072 |
| cb | 18 | 66.87416 | 32.71679 | 0 | 113.2611 |
| hab | 24 | 697397.8 | 977204.4 | 30890 | 4207610 |
| km2 | 24 | 9984.114 | 7673.664 | 15.431 | 29641.52 |
| esco | 24 | 9.8875 | .8778989 | 8.5 | 12.4 |
| alfa | 24 | 6.304167 | 3.134309 | 1.6 | 13.6 |
| eya | 24 | 76101.91 | 130200.9 | 1908 | 510571 |

-> anio = 2018

| Variable | Obs | Mean | Std. dev. | Min | Max |
|----------|-----|----------|-----------|----------|----------|
| anio | 24 | 2018 | 0 | 2018 | 2018 |
| prov | 0 | | | | |
| crs | 21 | 100.5358 | 64.62356 | 28.04891 | 245.6156 |
| cce | 18 | 108.1702 | 60.20917 | 29.35102 | 232.8072 |
| cb | 14 | 74.59841 | 36.47455 | 26.55054 | 157.8954 |
| hab | 24 | 707631.4 | 992055.4 | 31600 | 4267893 |
| km2 | 24 | 9984.114 | 7673.664 | 15.431 | 29641.52 |
| esco | 24 | 9.06625 | 2.153331 | 0 | 11.98 |
| alfa | 24 | 7.294167 | 4.279298 | 0 | 21.04 |
| eya | 24 | 71273.83 | 119345.5 | 2245 | 443615 |

-> anio = 2019

| Variable | Obs | Mean | Std. dev. | Min | Max |
|----------|-----|----------|-----------|----------|----------|
| anio | 24 | 2019 | 0 | 2019 | 2019 |
| prov | 0 | | | | |
| crs | 21 | 94.79068 | 55.46361 | 25.82368 | 228.7566 |
| cce | 17 | 105.7897 | 74.65412 | 39.88472 | 316.6731 |
| cb | 12 | 75.75657 | 23.57995 | 46.66778 | 119.2349 |
| hab | 24 | 717787.7 | 1006851 | 32320 | 4327845 |
| km2 | 24 | 9984.114 | 7673.664 | 15.431 | 29641.52 |
| esco | 24 | 9.07875 | 2.151619 | 0 | 11.98 |
| alfa | 24 | 5.266667 | 2.231205 | 0 | 11 |
| eya | 24 | 75663.79 | 126827.1 | 2135 | 464936 |

-> anio = 2020

| Variable | Obs | Mean | Std. dev. | Min | Max |
|----------|-----|----------|-----------|----------|----------|
| anio | 24 | 2020 | 0 | 2020 | 2020 |
| prov | 0 | | | | |
| crs | 21 | 94.38524 | 57.30432 | 33.06589 | 300.6159 |
| cce | 19 | 104.5718 | 88.47169 | 25.89464 | 403.3959 |
| cb | 13 | 88.50834 | 37.2218 | 43.80087 | 173.2785 |
| hab | 24 | 727864 | 1021588 | 33042 | 4387434 |
| km2 | 24 | 9984.114 | 7673.664 | 15.431 | 29641.52 |
| esco | 24 | 9.083333 | 2.155209 | 0 | 12 |
| alfa | 24 | 7.291667 | 4.267971 | 0 | 21 |
| eya | 24 | 74550.42 | 122304.7 | 2175 | 453102 |

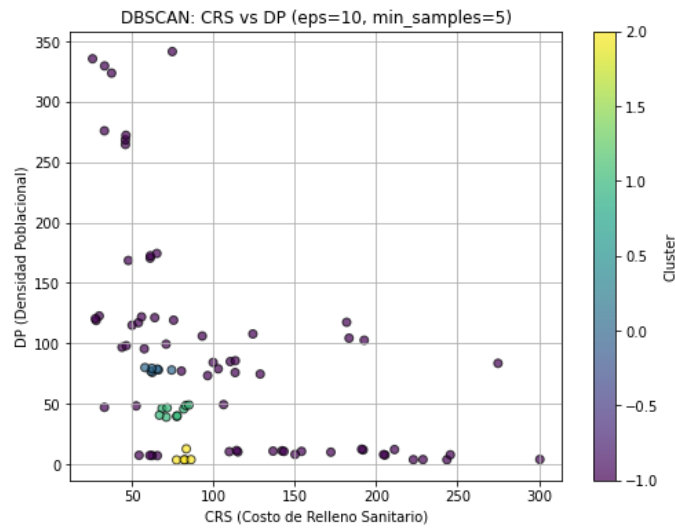
Anexo 8: Tendencia Anual de los años por CRS, CCE Y CB

| | CRS | CCE | CB |
|------|------------|------------|-----------|
| ANIO | | | |
| 2017 | 111.804992 | 98.890068 | 66.874163 |
| 2018 | 100.535816 | 108.170194 | 74.598415 |
| 2019 | 94.790682 | 105.789656 | 75.756572 |
| 2020 | 94.385239 | 104.571827 | 88.508337 |

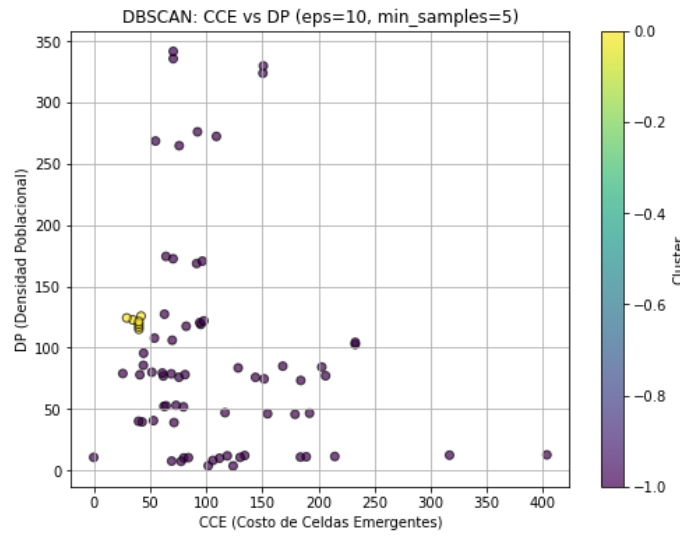
Anexo 9: Promedio general de CRS, CCE y CB

| | |
|-----|------------|
| CRS | 100.513604 |
| CCE | 104.191267 |
| CB | 75.575438 |

Anexo 10: Gráfico de ML, en DBSCAN con CRS y DP



Anexo 11: Gráfico de ML, en DBSCAN con CCE y DP



Anexo 12: Gráfico de ML, en DBSCAN con CB y DP

