

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE
DISPENSADORES URBANOS DE AGUA POTABLE EN UN MUNICIPIO DEL
NORTE DEL VALLE**

EFRAIN BOLAÑOS BARÓN

**UNIVERSIDAD DEL VALLE (SEDE ZARZAL)
FACULTAD DE INGENIERÍA
ZARZAL, VALLE DEL CAUCA
2025**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE
DISPENSADORES URBANOS DE AGUA POTABLE EN UN MUNICIPIO DEL
NORTE DEL VALLE**

BOLAÑOS BARON EFRAÍN – 2061203

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO BAJO LA MODALIDAD MONOGRAFÍA
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL**

**DIRECTOR
JULIÁN GONZALES VELASCO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE (SEDE ZARZAL)
FACULTAD DE INGENIERÍA
ZARZAL, VALLE DEL CAUCA
2025**

CONTENIDO

INDICE DE GRAFICOS	5
INDICE DE ILUSTRACIONES	5
INDICE DE TABLAS	5
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	8
1. DIAGNÓSTICO DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN ESPACIOS PÚBLICOS DE ZARZAL.....	16
1.1 Caracterización del municipio	17
1.1.1 Límites Geográficos y Extensión.....	18
1.1.2 Características Climáticas	18
1.1.3 Datos Demográficos	18
1.1.4 División Político-Administrativa	19
1.1.5 Infraestructura y Servicios Públicos	21
1.1.6 Economía y Actividad Productiva.....	21
1.1.7 Educación y Cultura.....	22
1.1.8 Análisis de demanda.....	22
1.2 HÁBITOS DE CONSUMO: AGUA EMBOTELLADA VS. FUENTES PÚBLICAS.....	23
1.2.1 Evaluación de factores logísticas.....	24
1.3 RESTRICCIONES: LIMITACIONES TÉCNICAS PARA LA INSTALACIÓN DE DISPENSADORES DE AGUA POTABLE EN ZARZAL, VALLE DEL CAUCA	26
1.3.1 Infraestructura Hidráulica y Capacidad Operativa.....	27
1.3.2 Limitaciones Técnicas en Espacios Públicos.....	27
1.3.3 Riesgos de Contaminación y Mantenimiento	28
1.4 RESTRICCIONES: NORMATIVAS LEGALES PARA LA INSTALACIÓN DE DISPENSADORES DE AGUA POTABLE EN ZARZAL.....	28
1.4.1 Marco Jurídico Municipal y Departamental	28
1.4.2 Normativas sobre Espacio Público y Urbanismo	29
1.4.3 Normativas Ambientales y de Gestión del Riesgo	30
1.4.4 Normativas de Seguridad y Orden Público	30
2 ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS TÉCNICOS, AMBIENTALES Y URBANOS QUE ORIENTEN LA UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE DISPENSADORES PÚBLICOS DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE ZARZAL.....	34

2.1	SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO.....	38
2.2	MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CANTIDAD Y UBICACIÓN DE DISPENSADORES.....	43
2.2.1	Modelo de cobertura máxima (Maximal Covering Location Problem – MCLP) 45	
2.2.2	Modelo P-mediana.....	45
2.2.3	Modelo de asignación óptima	46
2.2.4	Modelo de cobertura máxima: eficiencia con limitaciones	47
2.2.5	Modelo P-mediana: equidad territorial con enfoque espacial	47
2.2.6	Modelo de asignación óptima: pertinencia social y estratégica	47
2.2.7	Modelo Codo de Jambú: Asignación óptima de clusters territoriales	48
2.3	PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE DISPENSADORES PÚBLICOS DE AGUA EN ZARZAL	49
2.3.1	Fase 1: Localización macro mediante modelo de asignación óptima y clusterización territorial.....	49
2.3.2	Fase 2: Evaluación de criterios seleccionados por expertos mediante herramientas multicriterio (AHP difuso + BOCR)	51
2.3.3	Fase 3: Conclusiones del proceso metodológico.....	52
2.4	Selección de criterios priorizados mediante validación experta: resultados de seis especialistas en planificación territorial	53
2.5	Fase 1: Localización macro mediante segmentación territorial con método del codo de Jambú	57
2.6	Fase 2: Evaluación de criterios seleccionados por expertos mediante herramientas multicriterio (AHP difuso + BOCR).....	61
2.7	Fase 3: Conclusiones del proceso metodológico	65
3	TRABAJOS FUTUROS	68
4	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	70

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Metodología de trabajo. Tomado de: Elaboración propia.	15
Gráfico 2. Pirámide poblacional del municipio de Zarzal. Fuente: Departamento Nacional de Planeación, 2022.	19
Gráfico 3. Cobertura de Servicios Domiciliarios. Tomado de Censo Nacional de Población y Vivienda, DANE, 2018: ("PROGRAMA DE GOBIERNO")	21

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa en 2D de Zarzal, Valle del Cauca. Tomado de: Google Earth.	17
Ilustración 2. Mapa casco urbano del municipio de Zarzal. Fuente: Plan básico de ordenamiento territorial de Zarzal, 2012.	20
Ilustración 3. Ruta de matriz de distancias. Fuente: Elaboración propia	58
Ilustración 4. Aplicación del Método de Codo De Jambú. Fuente: Elaboración Propia	58
Ilustración 5. Aplicación método K-Means. Fuente: Elaboración Propia	59
Ilustración 6. Clusteración de datos. Fuente: Elaboración Propia	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Puntos críticos de necesidad. Fuente: Elaboración propia.	24
Tabla 2. Espacios físicos viables para la instalación. Fuente: Elaboración propia.	25
Tabla 3. Autor vs Criterio. Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 4. Criterios técnicos. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 5. Criterios sociales. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 6. Criterios ambientales. Fuente: Elaboración propia.	38
Tabla 7. Criterios operativos. Fuente: elaboración propia.	38
Tabla 8. Herramientas multicriterio. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 9. Clúster y coordenadas cartesianas. Fuente: Elaboración Propia	60
Tabla 10. Peso relativo de Macro - Criterios. Fuente: Elaboración Propia	62
Tabla 11. Peso de Criterios. Fuente: Elaboración Propia	63

RESUMEN

En estudio se presenta una propuesta integral para la micro-localización de dispensadores públicos de agua potable en el municipio de Zarzal, esta propuesta fue construida a partir de un proceso metodológico riguroso que articula herramientas de análisis espacial, modelos multicriterio y participación experta. La investigación se desarrolló en tres fases complementarias, dichas fases permitieron avanzar desde la segmentación territorial hasta la selección final de sitios estratégicos, con base en criterios técnicos, sociales y ambientales validados por actores locales.

En la Fase 1, se aplicó el algoritmo K-Means, esto permitió agrupar los 48 barrios del municipio en tres clústeres homogéneos, considerando variables como densidad poblacional, proximidad geográfica y dinámica urbana. Esta segmentación territorial fue clave para facilitar la focalización de alternativas y permitió construir una base operativa para la toma de decisiones, garantizando una distribución equitativa de los recursos.

La Fase 2 permitió abordar la priorización de criterios mediante la integración de dos herramientas multicriterio: el modelo BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos), que permitió clasificar las variables estratégicas del proyecto, y el AHP difuso, que tradujo los juicios expertos en porcentajes de importancia bajo condiciones de incertidumbre. Esta etapa permitió afianzar la veracidad de los clústeres definidos en la fase anterior y logro la realización de la consolidación de la selección de 18 barrios estratégicos: 7 ubicados en el clúster 1, 5 ubicados en el siguiente, el clúster 2 y 6 ubicados en el clúster 3. Los criterios que mejor fueron valorados por los expertos fueron cobertura poblacional potencial, calidad del agua disponible, aceptación comunitaria y cercanía a zonas de alta afluencia.

En la Fase 3, el análisis correspondiente fue direccionado mayoritariamente en el proceso metodológico, permitiendo la validación de la coherencia entre cada una de las etapas, el acierto de los criterios seleccionados y la importancia dada a los resultados obtenidos. El enfoque que aplicado en este proyecto demuestra que la combinación de análisis espacial y evaluaciones multicriterio logra la construcción de soluciones sólidas, contextualizadas, y debidamente fundamentadas. Esta propuesta es la respuesta clara a una necesidad concreta —intentar mejorar el acceso al agua potable en espacios públicos—, sino que también permite el establecimiento de un marco estratégico replicable para la planificación urbana en municipios con alta complejidad territorial como es el caso del municipio objeto de estudio.

Estas investigaciones son una clave idónea e importante para fortalecer la capacidad institucional, ambiental y social que tiene el municipio, mejorando la asignación de recursos por parte de las entidades públicas gubernamentales y promoviendo decisiones basadas en evidencia e investigación científica. Además, ayudan a posicionar a Zarzal como un referente en la adaptación de metodologías innovadoras, participativas y orientadas al bienestar colectivo.

PALABRAS CLAVE: AHP difuso, Análisis espacial, Dispensadores públicos, Herramientas multicriterio, Planificación urbana

ABSTRACT

This study presents a comprehensive proposal for the micro-location of public drinking water dispensers in the municipality of Zarzal. The proposal was developed through a rigorous methodological process that integrates spatial analysis tools, multicriteria models, and expert participation. The research was carried out in three complementary phases, which enabled progress from territorial segmentation to the final selection of strategic sites, based on technical, social, and environmental criteria validated by local stakeholders.

In Phase 1, the K-Means algorithm was applied to group the municipality's 48 neighborhoods into three homogeneous clusters, considering variables such as population density, geographic proximity, and urban dynamics. This territorial segmentation was key to facilitating the targeting of alternatives and provided an operational foundation for decision-making, ensuring an equitable distribution of resources.

Phase 2 addressed the prioritization of criteria through the integration of two multicriteria tools: the BOCR model (Benefits, Opportunities, Costs, and Risks), which classified the project's strategic variables, and fuzzy AHP, which translated expert judgments into weighted percentages under conditions of uncertainty. This phase reinforced the validity of the clusters defined in the previous stage and led to the consolidation of 18 strategic neighborhoods: 7 in Cluster 1, 5 in Cluster 2, and 6 in Cluster 3. The criteria most highly rated by experts included potential population coverage, available water quality, community acceptance, and proximity to high-traffic areas.

In Phase 3, a cross-cutting analysis of the methodological process was conducted, validating the coherence between stages, the relevance of the selected criteria, and the significance of the results obtained. The applied approach demonstrates that combining spatial analysis with multicriteria evaluation enables the construction of solid, contextualized, participatory, and well-founded solutions. The proposal not only addresses a concrete need—improving access to drinking water in public spaces—but also establishes a replicable strategic framework for urban planning in municipalities with high territorial complexity.

Such research is essential for strengthening the municipality's institutional capacity, improving resource allocation, and promoting evidence-based decision-making. Moreover, it helps position Zarzal as a reference in the adaptation of innovative, participatory methodologies oriented toward collective well-being.

KEYWORDS: Fuzzy AHP, Spatial analysis, Public dispensers, Multicriteria tools, Urban planning.

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es un derecho humano esencial. Millones de personas en el mundo enfrentan barreras para obtenerla, sobre todo en zonas cálidas donde la infraestructura no alcanza o simplemente no funciona bien. Países como Sudáfrica, México y Australia instalan estaciones públicas de recarga para mejorar la equidad y fomentar hábitos sostenibles (Osum Blog, 2024; Civiq Australia, 2024).

En Colombia, departamentos como La Guajira, Bolívar, Chocó y Meta viven dificultades hídricas constantes. Incluso en el Valle del Cauca, que tiene buena cobertura, todavía existen focos de exclusión. La Gobernación impulsa proyectos junto a Acuavalle para cerrar esas brechas, pero comunidades como Caracolí y Pardo Alto siguen con acceso limitado (UNICEF & Fundación Baxter Internacional, 2024; Greenpeace Colombia, 2024). El agua está cerca, pero no llega a todos.

Zarzal destaca por tener un clima cálido, movilidad peatonal y una cultura deportiva arraigada al día a día, lo que aumenta la necesidad de puntos de hidratación en espacios públicos. El propósito de este proyecto es diagnosticar la situación hídrica actual y proponer estaciones o dispensadores de agua potable que favorezcan tanto a deportistas como a la comunidad en general, ayudando a mejorando la salud, reduciendo el uso de plásticos y promoviendo una gestión hídrica sostenible y adecuada en pro del medio ambiente.

El agua potable es el recurso más esencial para la vida, no solo por su papel en el consumo y la higiene diaria, sino porque también tiene un impacto directo en la salud pública, el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental. A pesar de su importancia, mas 2.2 mil millones de personas en el mundo aún carecen de acceso a agua potable gestionada de forma segura y constante, esto contribuye a la propagación de enfermedades como el cólera, la diarrea y la fiebre tifoidea, responsables de más de 485,000 muertes anuales, muchas de ellas en niños menores de cinco años (Organización Mundial de la Salud, 2022).

El acceso equitativo e igualitario al agua potable también importa en el desarrollo social y económico, mejora la productividad, reduce los costos médicos y permite que los niños asistan a la escuela en lugar de dedicar horas a recolectar agua, también fomenta la igualdad de género, ya que en muchas regiones son las mujeres y niñas quienes asumen esta tarea (Naciones Unidas, 2021).

Ambientalmente, el agua potable suele ser un recurso limitado cuya conservación es urgente frente al cambio climático y el crecimiento demográfico. Su gestión sostenible permite enfrentar fenómenos naturales como sequías e inundaciones, asegurando su disponibilidad para futuras generaciones (Naciones Unidas, 2021).

Según esta situación, el acceso universal al agua potable se convierte en una prioridad estratégica y fundamental dentro de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, que exige la cooperación entre gobiernos, organizaciones internacionales y comunidades locales para garantizar este derecho fundamental.

Las enfermedades que están relacionadas con el agua contaminada —como el cólera, la diarrea infecciosa y la fiebre tifoidea— están fuertemente vinculadas a la falta de saneamiento adecuado. Estas enfermedades son causadas por bacterias como *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y *Shigella* spp., que se multiplican en aguas insalubres (Organización Mundial de la Salud, 2022; Naciones Unidas, 2021). En la región de las Américas, la tasa de mortalidad atribuida al agua contaminada y al saneamiento inseguro es de aproximadamente 4.96 muertes por cada 100,000 habitantes (Organización Panamericana de la Salud, 2023).

El tratamiento de estas enfermedades suele variar según su causa. El cólera requiere rehidratación oral o intravenosa y, en casos muy graves, antibióticos (Medicover Hospitals, 2025). La fiebre tifoidea suele tratarse con azitromicina o ceftriaxona (Saúde, 2025) y la diarrea infecciosa se aborda principalmente con hidratación y antibióticos específicos (Instituto del Agua, 2025).

Al final, el acceso al agua potable transforma la vida de comunidades vulnerables. En áreas rurales de países en vía de desarrollo, algunas iniciativas como pozos comunitarios y sistemas de purificación han minimizado la frecuencia de aparición de enfermedades y mejoran la asistencia escolar, especialmente entre niñas. cómo se ha evidenciado en Etiopía (Naciones Unidas, 2021).

La gestión del agua potable es una parte esencial para la sostenibilidad ambiental global, especialmente teniendo en cuenta el cambio climático, que se ha intensificado la crisis hídrica en múltiples regiones. La preservación de fuentes hídricas y la adopción de tecnologías de purificación son medidas urgentes y muy importantes para garantizar el acceso equitativo al agua, tanto a nivel internacional como en comunidades locales (Pastrana-Miranda & González-Caamal, 2022).

Para el municipio de Zarzal, Valle del Cauca, esta problemática se manifiesta con una particular intensidad. El municipio tiene un clima cálido, con temperaturas que rondan entre los 27 °C y 29 °C y máximos de hasta 35 °C, también cuenta con una humedad relativa superior al 70%, esto genera condiciones que favorecen a la deshidratación, especialmente entre quienes no cuentan con un método de transporte motorizado, se transportan a pie o practican deportes como ciclismo y running (Rivera Castillo, 2017). La falta de puntos estratégicos de hidratación o dispensadores de agua en espacios públicos representa un riesgo para la salud y limita el desarrollo de una cultura deportiva saludable.

Estudios de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2013) indican que una pérdida del 2% del agua corporal o más puede afectar significativamente el rendimiento físico y mental, además de que puede aumentar el riesgo de fatiga, calambres y golpes de calor que pueden causar serias afectaciones en la salud del individuo. En este contexto, la falta de infraestructura hídrica adecuada en Zarzal se transforma en un obstáculo claro para el bienestar de la población y el sano cumplimiento de sus actividades deportivas y culturales.

Además, la falta de estaciones de recarga de agua potable fomenta el uso excesivo de envases plásticos desechables, como aguas embotelladas, en bolsas o gaseosas, aumentando la problemática que genera la contaminación ambiental. La implementación de estas fuentes diseñadas para la recarga de botellas reutilizables ha demostrado ser una estrategia adecuada en diversas ciudades del mundo para reducir la contaminación plástica y promover hábitos sostenibles (Salazar López & Marín Cifuentes, 2016).

Sin importar los avances en infraestructura hídrica, una de las alternativas más comunes para suplir la falta de acceso a agua potable en espacios públicos es el consumo de agua embotellada. Esta solución, aunque práctica en el corto plazo, ha generado una problemática ambiental y económica a nivel mundial. El uso masivo de botellas plásticas desechables ha aumentado significativamente a la contaminación de ecosistemas acuáticos y terrestres, con más de 8 millones de toneladas de plástico ingresando a los océanos cada año (Greenpeace, 2024). Además de eso, la producción y transporte de agua embotellada implica una huella de carbono considerable, lo que contradice los principios de sostenibilidad ambiental promovidos por la Agenda 2030.

Tomando una perspectiva económica, el agua embotellada significa un gasto elevado para las familias, particularmente en contextos de vulnerabilidad. Mientras el costo promedio del agua potable suministrada por acueducto en Colombia se sitúa entre 1,300COP y 3,400COP por metro cúbico, dependiendo del estrato socioeconómico y el municipio (CRA, 2025; EMMIR ESP, 2025), el agua embotellada puede alcanzar valores superiores a los 2,000,000COP por metro cúbico, teniendo en cuenta que una botella de 600 ml puede costar entre 1,500COP y 3,000COP en el mercado minorista (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2024; Revista Dinero, 2023). Esta diferencia de precios muestra una barrera económica significativa que afecta el acceso equitativo al recurso hídrico, especialmente en zonas donde no existen fuentes públicas de agua potable.

En el municipio de Zarzal, Valle del Cauca, esta situación suele ser común y constante. El consumo per cápita de agua embotellada ha aumentado en los últimos años, especialmente entre deportistas y transeúntes que no cuentan con puntos públicos de hidratación como en países mayormente desarrollados. Según estimaciones locales, se utilizan más de 1,500 botellas plásticas por día en espacios deportivos y recreativos, lo que genera un volumen significativo de residuos no reciclados y una carga económica para los usuarios (Indervalle, 2024; Alcaldía de Zarzal, 2024). Esta dependencia del agua embotellada no solo aumenta la huella ecológica del municipio, sino que también limita el ejercicio pleno del derecho al agua potable en el espacio público.

Frente a esta problemática, este proyecto propone identificar ubicaciones óptimas para la instalación de nuevas fuentes hídricas en el municipio de Zarzal, como estrategia para mejorar la accesibilidad al agua potable en espacios públicos, optimizar el rendimiento deportivo de los usuarios de escenarios recreativos y reducir el impacto ambiental asociado al consumo de agua

embotellada. Esta iniciativa busca ofrecer una alternativa económica, sostenible y equitativa que responda a las necesidades reales de la comunidad, especialmente en zonas con alta afluencia peatonal y limitada infraestructura de abastecimiento. Esta propuesta fue construida desde un enfoque integral y holístico, que permite contemplar el análisis de las condiciones actuales de suministro, patrones de movilidad urbana, distribución territorial de los equipamientos deportivos y recreativos hallados en el municipio, así como los criterios técnicos y sociales que afectan la localización de puntos de acceso importantes al recurso hídrico. Como resultado final, se plantea una solución que permite el mejoramiento del ejercicio pleno del derecho al agua en el espacio público, sino que además, permite promover la equidad territorial, la salud colectiva y la sostenibilidad ambiental. En este orden de ideas, gracias a este análisis de la literatura se formula una pregunta de investigación y se convierte en una herramienta importante que contribuye al diseño de políticas locales más eficientes.

Pregunta de investigación:

¿Cómo se pueden identificar diversos criterios que permitan establecer una ubicación estratégica de dispensadores de agua potable y que además, contribuyan al bienestar y la salud de los habitantes del municipio objeto de estudio, y como dichos criterios pueden ayudar a identificar los puntos clave para su respectiva instalación?

El acceso al agua potable es un derecho humano que debe ser esencial, que está estrechamente vinculado con la salud pública, el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. En el municipio de Zarzal, en el Valle del Cauca, la limitada disponibilidad de fuentes hídricas en espacios públicos, deportivos y de alta afluencia representa un desafío significativo, particularmente para quienes se movilizan a pie y para los deportistas que practican ciclismo y running o cualquier otro tipo de deportes bajo condiciones climáticas cálidas (Salazar López & Marín Cifuentes, 2016).

Viéndolo desde un enfoque deportivo, una hidratación adecuada debe de ser la clave para el rendimiento físico correcto. La falta de puntos hídricos que permitan el abastecimiento de agua puede provocar fatiga, calambres, golpes de calor y disminución de la concentración e incluso, en casos extremos, paros cardíacos fulminantes y como consecuencia, la muerte. La instalación de estaciones de recarga o dispensadores de agua permitiría a los deportistas zarzaleños acceder fácilmente a agua potable durante sus recorridos, reduciendo riesgos, optimizando su desempeño y, como plus, minimizando la huella de carbono en el municipio al evitar el uso inescrupuloso de plásticos como botellas y bolsas de agua (Salazar López & Marín Cifuentes, 2016).

Además del impacto en la salud, la falta de infraestructura hídrica adecuada fomenta el uso de plásticos de un solo uso, aumentando la contaminación ambiental del municipio. En otros países, como Francia, Países Bajos, Islandia, entre otros, la

implementación y uso de fuentes que permitan recargar botellas reutilizables ha demostrado ser eficaz y fundamental en la reducción de residuos y en la promoción de hábitos sostenibles. Replicar y aplicar responsablemente esta estrategia en Zarzal ayudaría tanto al bienestar comunitario como a la sostenibilidad y mantenimiento ecológica (Pastrana-Miranda & González-Caamal, 2022).

Tomándolo desde una perspectiva urbana y social, garantizar el acceso equitativo e ilimitado al agua potable en espacios públicos, especialmente aquellos que son de alta afluencia, es más que importante para construir entornos funcionales y responsables. La distribución estratégica de fuentes hídricas o dispensadores en zonas de alta vulnerabilidad o limitaciones en el servicio mejoraría la movilidad peatonal y reforzaría el derecho al agua como recurso fundamental.

De igual forma, la educación y la cultura hídrica son fundamentales y necesarios para la conservación de los recursos naturales. Promover la concienciación sobre el uso responsable del agua y fomentar prácticas sostenibles puede generar un cambio positivo en la comunidad y el municipio, fortaleciendo el compromiso de la sociedad en general.

JUSTIFICACIÓN

El acceso ilimitado al agua potable se vuelve un derecho humano fundamental para la salud pública, el desarrollo sostenible y la protección ambiental. En Zarzal, Valle del Cauca, la limitada disponibilidad de fuentes hídricas en espacios públicos afecta especialmente a peatones y deportistas, quienes, usualmente, son los que enfrentan riesgos de deshidratación en un entorno de clima cálido y alta demanda de hidratación como los que se presentan en el municipio (Salazar López & Marín Cifuentes, 2016).

Desde la perspectiva de los deportistas, la falta de fuentes hídricas que permitan la recarga de agua impacta de forma negativa el rendimiento físico y la salud de los atletas locales, generando condiciones negativas, de propensas a fatiga, golpes de calor y otros efectos adversos. La implementación de fuentes de abastecimiento o dispensadores hídricos permitiría mejorar el bienestar de los deportistas y locales, optimizar su desempeño y reducir riesgos asociados a la deshidratación (Salazar López & Marín Cifuentes, 2016).

A nivel ambiental, la falta de estaciones de recarga o dispensadores aumenta y fomenta el uso de plásticos desechables, incrementando la contaminación. Experiencias en otras ciudades han demostrado que la instalación de fuentes para botellas reutilizables es una estrategia altamente adecuada para reducir residuos y promover hábitos ecológicos (Pastrana-Miranda & González-Caamal, 2022).

En respuesta a estos desafíos, este proyecto busca proponer una metodología para determinar la ubicación óptima de fuentes hídricas en Zarzal, con el objetivo de mejorar la accesibilidad, promover la sostenibilidad ambiental y fomentar hábitos saludables. Esta iniciativa busca consolidar un modelo de planificación urbana que

contribuya a transformar el municipio en un entorno más eficiente, equitativo y sostenible a largo plazo.

OBJETIVO GENERAL

Realizar una propuesta metodológica para la ubicación de dispensadores de agua en el municipio de Zarzal, Valle del Cauca, con el propósito de mejorar la accesibilidad al agua potable, promover la sustentabilidad ambiental y fomentar hábitos saludables entre sus habitantes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar la situación actual del abastecimiento de agua potable en espacios públicos de Zarzal, identificando las principales zonas con déficit de acceso a fuentes hídricas y sus efectos en la comunidad.
- Determinar los criterios técnicos, ambientales y urbanos para la ubicación estratégica de dispensadores de agua en el municipio, tomando en cuenta factores como movilidad, demanda poblacional y sostenibilidad ecológica.
- Proponer la localización de dispensadores de agua urbana en el municipio de Zarzal, Valle del Cauca.

La ONU reconoce que el derecho al agua potable es fundamental y obligatorio para con la dignidad y equidad de la población (ONU, 2010). Sin embargo, en varias regiones del mundo, la disponibilidad de fuentes hídricas en espacios públicos sigue siendo limitada, generando afectaciones especialmente a comunidades vulnerables y personas con alta actividad física (ISGlobal, 2015). Esta situación usualmente se ve reflejada en el municipio de Zarzal, Valle del Cauca, donde la infraestructura hídrica urbana es demasiado limitada, impactando de forma negativa en la calidad de vida y el desarrollo deportivo y social (Salazar López & Marín Cifuentes, 2016).

La deshidratación, usualmente provocada por la falta de acceso a agua potable, reduce la concentración y el rendimiento físico, lo que aumenta el riesgo de golpes de calor y fatiga (Casa et al., 2019). En espacios urbanos concurridos como parques o ciclovías, la ausencia de fuentes de hidratación se transforma en un riesgo para la salud pública y la movilidad urbana (Tratamos el Agua, 2025; Rivera Castillo, 2017).

En países desarrollados, la ubicación estratégica de estas fuentes hídricas o dispensadores de agua fue posible gracias a modelos matemáticos y herramientas multicriterio como AHP, TOPSIS y PROMETHEE, dichos modelos permiten evaluar variables como accesibilidad, densidad poblacional e impacto ambiental entre otros (Urrego Zuluaga, 2021; Gutiérrez & Restrepo, 2022). Dichas metodologías promueven decisiones claras y participativas, facilitando la planificación urbana

eficiente y consciente (US EPA, 2009; Pastrana-Miranda & González-Caamal, 2022).

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Como se ha dicho con anterioridad, el acceso al agua potable es un derecho humano sumamente fundamental, reconocido por la ONU e indispensable para la dignidad y la equidad social (ONU, 2010). Sin embargo, en varias regiones, incluido Zarzal, Valle del Cauca, aún se conserva una carencia de infraestructura hídrica en espacios públicos, lo que afecta especialmente a comunidades vulnerables y a quienes realizan actividades físicas al aire libre (ISGlobal, 2015; Salazar López & Marín Cifuentes, 2016).

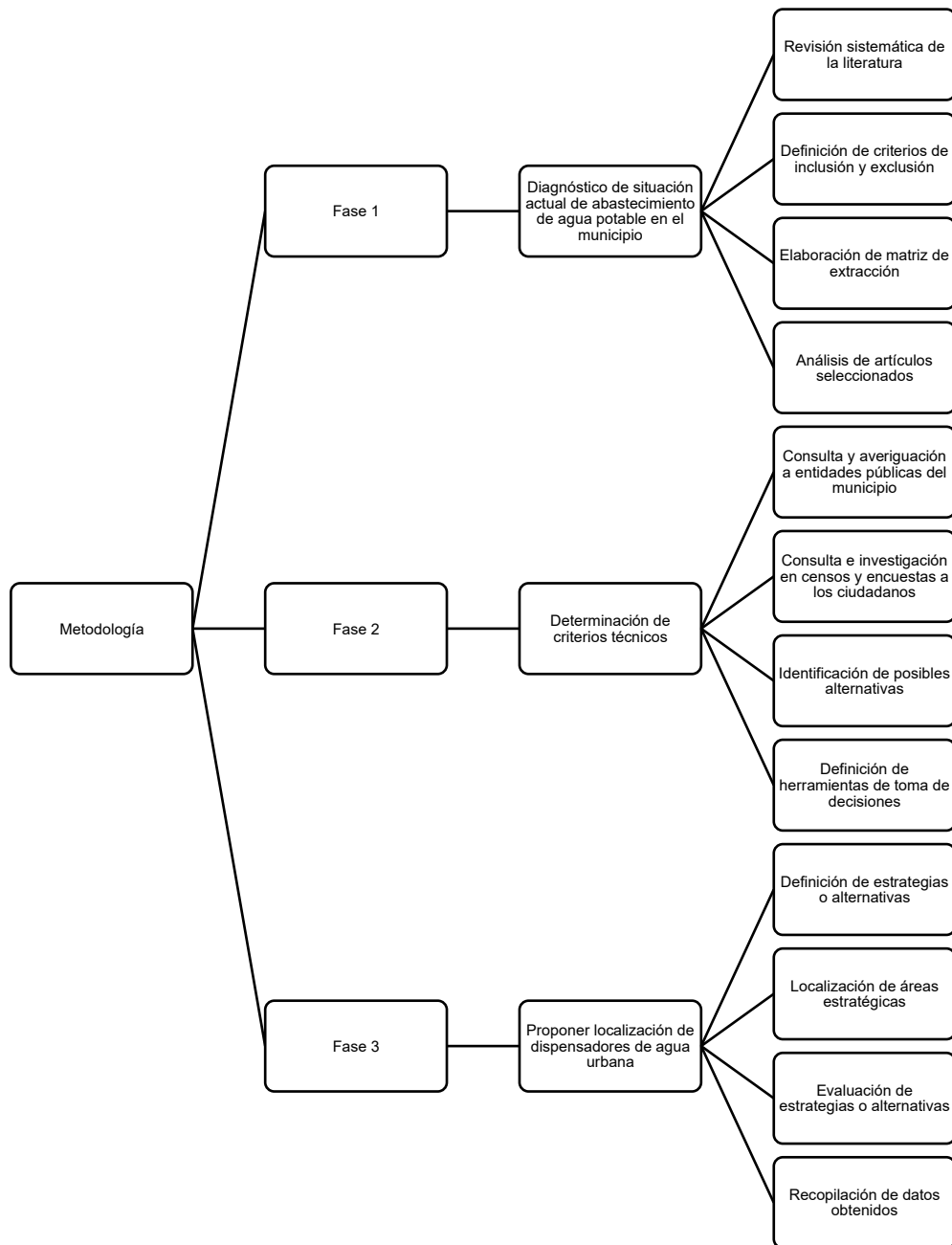
La deshidratación impacta de forma negativa el rendimiento físico y mental, incluso con pérdidas mínimas de agua corporal (Casa et al., 2019). En Zarzal, la falta de fuentes hídricas en zonas urbanas de alta afluencia —como parques, ciclovías, coliseos y estadios— es un riesgo para la salud y limita la movilidad urbana normal de la población (Tratamos el Agua, 2025; Rivera Castillo, 2017). Además, esta carencia aumenta el uso de plásticos desechables, aumentando la gravedad de la contaminación ambiental. La instalación de fuentes para botellas reutilizables ha demostrado ser eficaz en la promoción de hábitos sostenibles y en la mejora del entorno ecológico (Camacho Donado, 2020; Urdampilleta et al., 2013).

En contextos internacionales, la planificación de infraestructura hídrica se apoya en modelos matemáticos y herramientas de análisis multicriterio como AHP, TOPSIS y PROMETHEE, que permiten evaluar variables como accesibilidad, impacto ambiental y viabilidad técnica (Urrego Zuluaga, 2021; Gutiérrez & Restrepo, 2022). Estas importantes metodologías ayudan a promover decisiones transparentes y participativas, facilitando la comunicación entre autoridades y ciudadanía (US EPA, 2009).

METODOLOGÍA

Para el óptimo desarrollo esta investigación, se adoptará una metodología estructurada en tres fases, cada una diseñada para garantizar el cumplimiento de los objetivos específicos establecidos. Las actividades contempladas en cada etapa estarán orientadas a la recolección, análisis y aplicación de la información clave para la correcta implementación del estudio.

Gráfico 1. Metodología de trabajo. Tomado de: *Elaboración propia.*



1. DIAGNÓSTICO DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN ESPACIOS PÚBLICOS DE ZARZAL

Con el propósito de avanzar en la formulación de soluciones urbanas sostenibles, se desarrolla un diagnóstico integral que permite analizar las condiciones actuales del municipio de Zarzal, Valle del Cauca, en relación con el acceso al agua potable en espacios públicos. Este ejercicio constituye una fase esencial dentro del anteproyecto, ya que proporciona los insumos técnicos, sociales y ambientales necesarios para evaluar la viabilidad de instalar dispensadores de agua en puntos estratégicos del territorio. La relevancia de este análisis radica en que, para garantizar la efectividad de cualquier intervención en el espacio público, es indispensable comprender las dinámicas territoriales, las necesidades de la población, las características de la infraestructura existente y los factores que inciden en el uso y apropiación del recurso hídrico.

En este contexto, el diagnóstico se orienta por el primer objetivo específico del anteproyecto, este objetivo busca identificar y caracterizar las variables que son limitantes y afectan el acceso equitativo al agua potable en zonas de alta afluencia peatonal, especialmente aquellas vinculadas a la práctica deportiva y la movilidad urbana. Esta aproximación corresponde a una problemática estructural que se ha documentado en muchos estudios sobre salud pública, urbanismo y sostenibilidad ambiental, dichos estudios señalan que la falta de infraestructura hídrica en espacios abiertos limita en gran medida el ejercicio pleno del derecho al agua, incrementa los riesgos de deshidratación y afecta negativamente la calidad de vida de la población (ONU, 2010; ISGlobal, 2015; Rivera Castillo, 2017).

En el caso particular de Zarzal, la ausencia de dispensadores de agua potable en parques, ciclovías, escenarios deportivos y zonas de alto tránsito peatonal son un desafío complejo para la gestión urbana. Esta situación se agrava por las condiciones climáticas del municipio, caracterizadas por temperaturas elevadas y una alta exposición solar, lo que incrementa la demanda de hidratación entre los habitantes, especialmente aquellos que realizan actividades físicas al aire libre como ciclismo y running (Salazar López & Marín Cifuentes, 2016). Algunos estudios como el de Casa et al. (2019) han mostrado que incluso una pérdida del 2% del agua corporal puede reducir significativamente la capacidad de concentración, aumentar la fatiga y disminuir el rendimiento físico y mental, lo que evidencia la necesidad de contar con infraestructura adecuada para garantizar el bienestar de la población.

Además de los impactos en la salud, el poco acceso a fuentes hídricas en espacios públicos tiene implicaciones ambientales relevantes. En falta de estaciones de recarga, los ciudadanos recurren al consumo de agua embotellada, lo que genera un aumento en el uso de plásticos de un solo uso, como botellas y bolsas, muy comunes en el país y contribuyen a la contaminación del entorno. Diversas ciudades han implementado con éxito sistemas de recarga para botellas reutilizables, logrando reducir la generación de residuos y fomentar hábitos sostenibles entre la población (Camacho Donado, 2020; Urdampilleta et al., 2013). En este orden de

ideas, la instalación de dispensadores de agua en Zarzal no solo tendría un impacto positivo en la salud y el bienestar social, sino también en la sostenibilidad ambiental del municipio.

Para abordar esta problemática de forma completa y correcta, el diagnóstico se debe apoyar en herramientas de análisis territorial y modelos de evaluación multicriterio que permiten la integración de variables como accesibilidad, densidad poblacional, cobertura de servicios públicos, impacto ambiental, costos y viabilidad técnica. En otros países en donde ya se han aplicado este tipo de metodologías, se muestra que Analytic Hierarchy Process, AHP por sus siglas en inglés, TOPSIS y PROMETHEE son herramientas muy comunes para seleccionar ubicaciones adecuadas de infraestructura hídrica en espacios públicos, dándole mayor importancia a la igualdad en el acceso y la eficiencia en la distribución del líquido a la población (Urrego Zuluaga, 2021; Gutiérrez & Restrepo, 2022). Esta clase de herramientas son las que permiten tomar decisiones respaldadas y transparentes, aumentando la facilidad de la participación de la comunidad y la unión entre autoridades locales y expertos (US EPA, 2009).

Es por esto que en este capítulo, se intenta desarrollar una caracterización más detallada y específica del territorio municipal, teniendo en cuenta sus condiciones físicas, sociales y ambientales, incluyendo también las dinámicas de uso del espacio público que pertenecen al municipio. Esta caracterización nos permitirá establecer criterios técnicos y sociales para la ubicación de los dispensadores, asegurando que la implementación de los mismos responda a las necesidades reales de la población contribuyendo a la construcción de un entorno urbano más justo, saludable y sostenible. El diagnóstico, por tanto, no se limitará a una descripción del estado actual, sino que también incluye una herramienta estratégica para la planificación territorial, la formulación de políticas públicas inclusivas y la transformación de la relación entre la comunidad y el recurso hídrico (Pastrana-Miranda & González-Caamal, 2022; ONU-Hábitat, 2020).

1.1 Caracterización del municipio

El municipio de Zarzal se ubica en el norte del departamento del Valle del Cauca, en el suroccidente colombiano, a aproximadamente 140 kilómetros de Cali, la capital departamental. Su fundación oficial data del 1 de abril de 1909, mediante el Decreto Nacional N.º 155 firmado por el presidente Rafael Reyes, aunque su historia como asentamiento humano se remonta a 1783, cuando era conocido como Pueblo Viejo. A lo largo del siglo XIX, el municipio atravesó varios cambios de nombre y categoría administrativa, hasta consolidarse como Zarzal en 1909 (Universidad del Valle, 2014; Urdinola, 2017). En la *Ilustración 1*

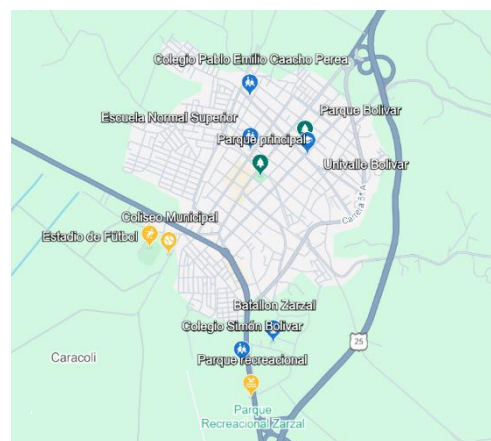


Ilustración 1. Mapa en 2D de Zarzal, Valle del Cauca. Tomado de: Google Earth.

se evidencian los principales puntos de referencia del municipio, lo que permite dimensionar su extensión territorial y dinámica de expansión.

Zarzal es reconocido como “La Tierra que Endulza a Colombia”, debido a su estrecha relación con el cultivo de caña de azúcar y la presencia de industrias emblemáticas como el ingenio Riopaila Castilla y la fábrica de dulces Colombina S.A., que han sido motores económicos y sociales del municipio desde mediados del siglo XX (Live Valle del Cauca, 2023).

1.1.1 Límites Geográficos y Extensión

Zarzal limita al norte con La Victoria, al noreste con La Tebaida (Quindío), al este con Sevilla, al sur con Bugalagrande, al suroeste con Bolívar y al oeste con Roldanillo. El municipio tiene una extensión territorial de 362.14 km², de los cuales aproximadamente 262 km² corresponden a zonas de clima cálido en el valle geográfico del río Cauca, y cerca de 100 km² a zonas de clima medio en el piedemonte de la Cordillera Central. Entre sus principales accidentes geográficos se destacan el cerro Pan de Azúcar, los altos de La Aurora y Montenegro, la sierra del Salado y la sierra de Zarzal (Universidad del Valle, 2014; CVC, 2006).

Desde el punto de vista hidrográfico, el municipio está atravesado por el río La Paila, que desemboca en el río Cauca, y también cuenta con los ríos La Vieja, las quebradas Las Cañas y La Honda, y los zanjones Murillo, Lajas y Limones (CVC, 2006).

1.1.2 Características Climáticas

Zarzal presenta un clima cálido tropical, con una temperatura promedio anual de 23 °C, aunque en temporadas de sequía puede superar los 35 °C. El año más caluroso registrado fue 2025, influenciado por el fenómeno de El Niño y la baja cobertura vegetal en zonas urbanas. La altitud media es de 916 metros sobre el nivel del mar, lo que permite una diversidad agroclimática favorable para cultivos como caña de azúcar, plátano, yuca, algodón, maíz, sorgo, soya, hortalizas y frutales (Secretaría de Salud del Valle, 2023; Universidad del Valle, 2014).

1.1.3 Datos Demográficos

Según el Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) 2018 del DANE, Zarzal cuenta con una población total de 39.343 habitantes, de los cuales 29.759 residen en la cabecera urbana y 9.584 en zonas rurales. La densidad poblacional es de 132.57 Hab/km², con una tendencia de crecimiento moderado. Entre los años 2010 y 2015, el municipio experimentó su pico más amplio de crecimiento, con un aumento poblacional del 7.4 %, impulsado por la expansión urbana y el desarrollo de nuevos barrios (DANE, 2018; Gobernación del Valle del Cauca, 2023).

Gráfico 2. Pirámide poblacional del municipio de Zarzal. Fuente: Departamento Nacional de Planeación, 2022.

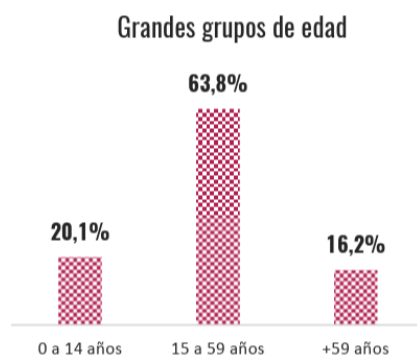
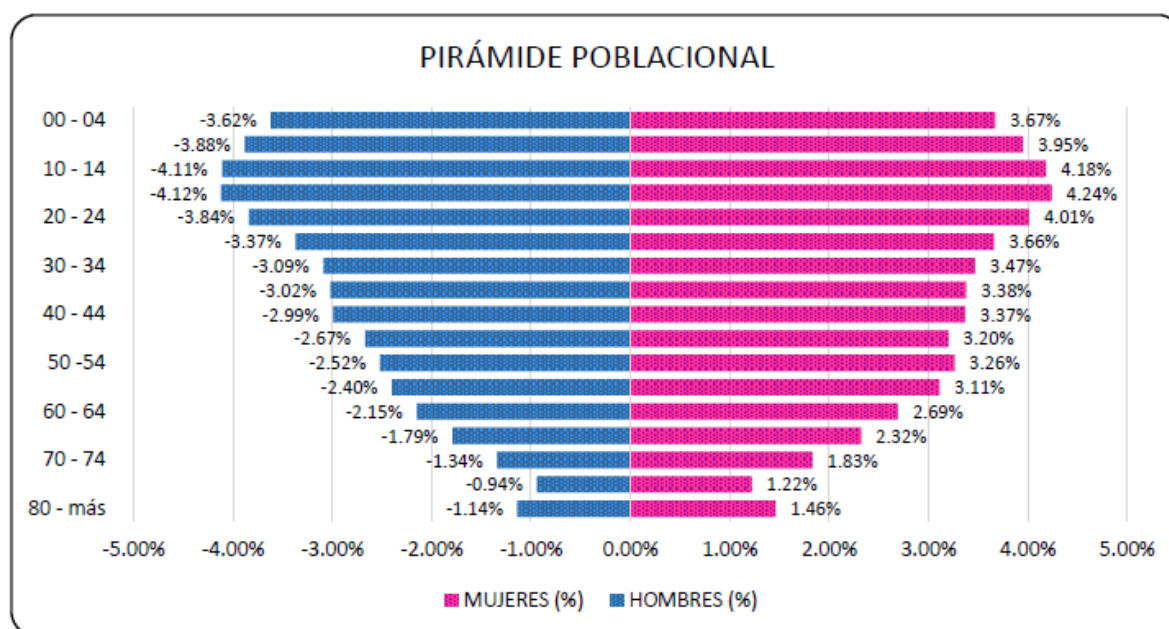


Ilustración 2. Grupos de edad Zarzal, Valle del Cauca. Tomado de: Censo Nacional de Población y Vivienda, DANE, 2018.

La *Ilustración 2* permite visualizar la estructura demográfica del municipio, evidenciando una población predominantemente joven, con una edad mediana de 26.8 años. El índice de masculinidad se sitúa en 90.2 hombres por cada 100 mujeres, mientras que el índice de envejecimiento ha mostrado un incremento sostenido, alcanzando el 16.2 % en población mayor de 59 años. Asimismo, el promedio de personas por hogar es de 3.0, y se destaca una baja tasa de analfabetismo, acompañada de una cobertura educativa amplia tanto en zonas urbanas como rurales (DANE, 2018; Gobernación del Valle del Cauca, 2023).

1.1.4 División Político-Administrativa

Presenta una configuración territorial compuesta por una cabecera municipal y varios corregimientos rurales, entre los que se destacan La Paila, Limones, Quebrada Nueva y Vallejuelo. A esta estructura se suman centros poblados de relevancia funcional como Estación Caicedonia, que actúan como nodos de articulación entre lo urbano y lo rural. Según registros oficiales y estudios previos

(Universidad del Valle, 2014; Urdinola, 2017), el municipio cuenta con 42 barrios formalmente registrados, los cuales han sido agrupados en sectores funcionales que responden a dinámicas históricas, socioeconómicas y espaciales: sector histórico central, desarrollo urbano moderno, zonas de vulnerabilidad socioeconómica y áreas de ruralidad dispersa.

En el marco del presente estudio se identificó que existen aproximadamente 48 barrios adicionales que no figuran en los registros oficiales, lo que evidencia una brecha significativa en la caracterización territorial del municipio. Esta situación plantea desafíos metodológicos y operativos para la planificación urbana, ya que limita la capacidad institucional de intervenir de manera equitativa y eficiente en todos los sectores habitados. La ausencia de registro formal de estos barrios puede estar asociada a procesos de expansión informal, rezago en la actualización catastral o falta de reconocimiento administrativo, lo cual refuerza la necesidad de incorporar herramientas multicriterio que permitan integrar criterios técnicos con sensibilidad territorial y social.

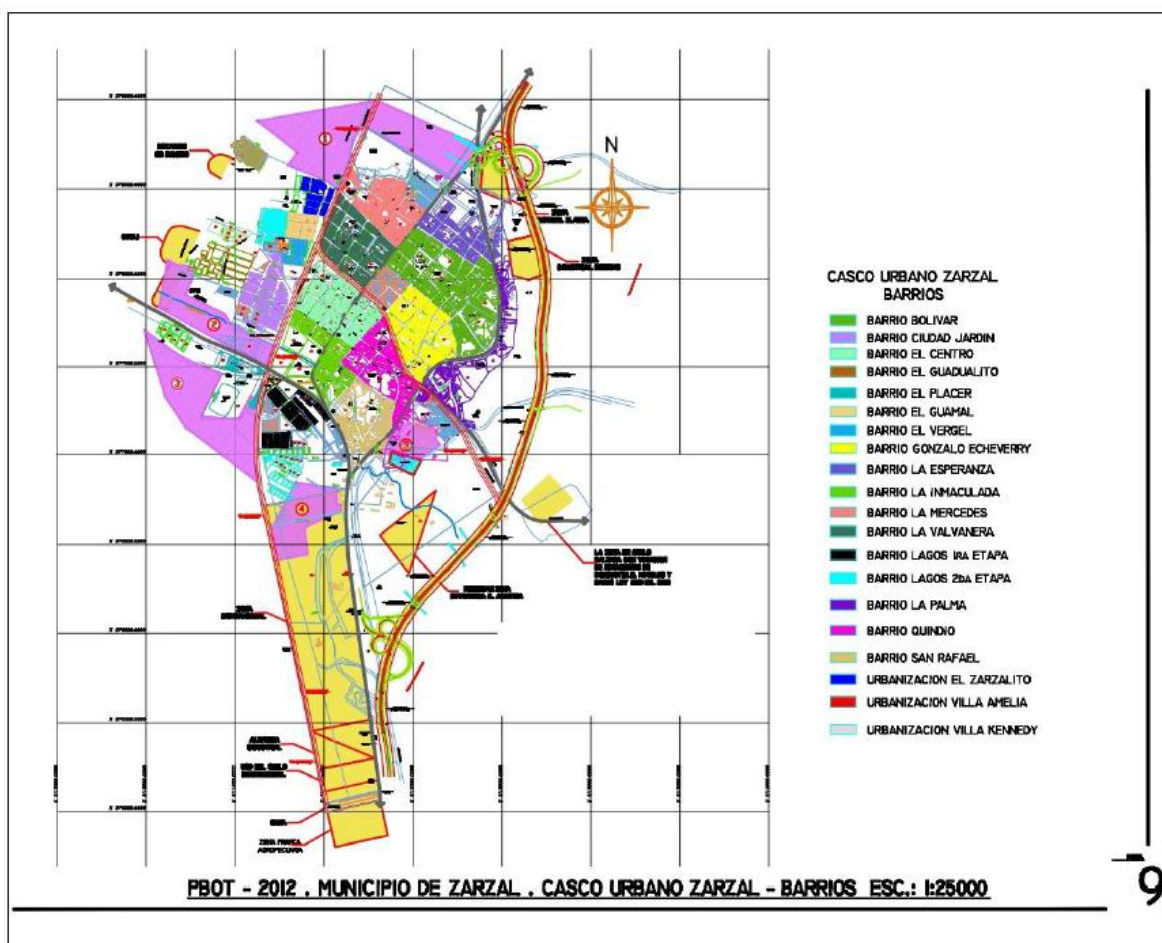
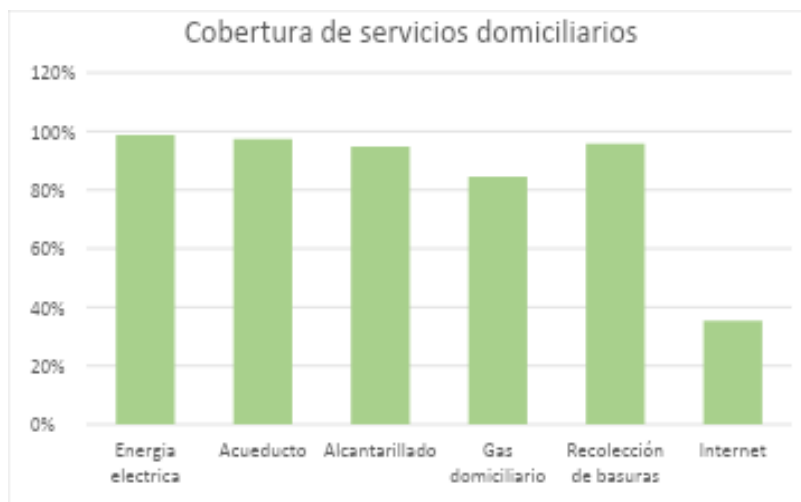


Ilustración 2. Mapa casco urbano del municipio de Zarzal. Fuente: Plan básico de ordenamiento territorial de Zarzal, 2012

1.1.5 Infraestructura y Servicios Públicos

La cobertura de servicios domiciliarios es alta, según el CNPV 2018:

Gráfico 3. Cobertura de Servicios Domiciliarios. Tomado de Censo Nacional de Población y Vivienda, DANE, 2018: ("PROGRAMA DE GOBIERNO")



No obstante, el municipio enfrentó su año más crítico en abastecimiento de agua en 2025, cuando una falla geológica en el sistema del embalse Sara Brut afectó el suministro para más de 19.000 usuarios en Zarzal y La Unión, evidenciando la necesidad de fortalecer la infraestructura hídrica y la gestión del recurso (Secretaría de Salud del Valle, 2023).

1.1.6 Economía y Actividad Productiva

La economía de Zarzal está basada principalmente en el cultivo extensivo de caña de azúcar, que ocupa más de 20.000 hectáreas del territorio. Además, se ha diversificado hacia la producción de alimentos, ganadería, avicultura, porcicultura, apicultura y pesca. El municipio cuenta con quince hatos lecheros y diez hectáreas dedicadas a la piscicultura, con especies como tilapia roja, cachama y bocachico (Universidad del Valle, 2014; Gobernación del Valle del Cauca, 2023).

La presencia de grandes industrias como Riopaila Castilla y Colombina S.A. ha generado empleo directo e indirecto, consolidando a Zarzal como un nodo agroindustrial estratégico en el norte del Valle del Cauca. También se ha observado un crecimiento sostenido de pequeñas y medianas empresas en los sectores de confección, alimentos procesados y servicios de salud (Urdinola, 2017).

1.1.7 Educación y Cultura

Zarzal cuenta con varias instituciones educativas públicas y privadas, entre ellas la Institución Educativa Normal Superior Nuestra Señora de las Mercedes, el Liceo del Saber, y sedes rurales como la Institución Educativa Antonio Nariño en La Paila. En 1986 se creó la Sede Zarzal de la Universidad del Valle, que ofrece programas académicos orientados al desarrollo agrícola y comunitario de la región (Universidad del Valle, 2014).

Desde el punto de vista cultural, el municipio celebra eventos como las Dulces Fiestas de La Paila, el Encuentro de Coros, y actividades ecoturísticas en sitios como el Kartódromo Internacional, el Bosque de Caracolíes, el Complejo Leña Verde y la Loma de la Cruz. Estas iniciativas han convertido a Zarzal en un centro de atracción turística regional (Live Valle del Cauca, 2023).

1.1.8 Análisis de demanda

La demanda de agua en Zarzal está estrechamente vinculada a la dinámica urbana, la concentración poblacional y la funcionalidad de los espacios públicos. A partir del diagnóstico territorial y la revisión de fuentes oficiales, se identifican las siguientes zonas de alta afluencia de público como puntos críticos de necesidad hídrica:

- **Centros educativos:** El municipio cuenta con más de 20 instituciones educativas oficiales. Entre ellas destacan la I.E. Efraín Varela Vaca, ubicada en el barrio La Inmaculada, que concentra la mayor matrícula de estudiantes de primaria en el municipio, con más de 2.100 alumnos distribuidos en seis sedes (Institución Educativa Efraín Varela Vaca, 2023). También sobresale la I.E. Simón Bolívar, ubicada en la salida sur vía Cali, considerada el colegio más grande del municipio, con cobertura en educación preescolar, básica, media académica y técnica, y más de cinco sedes operativas (Institución Educativa Simón Bolívar, 2023). Estas instituciones generan una alta demanda de agua para consumo, aseo, servicios sanitarios y actividades pedagógicas.
- **Zonas deportivas:** El complejo deportivo Villa Olímpica, el Kartódromo Internacional, y múltiples canchas barriales (como las de Pueblo Nuevo, El Bosque y Las Brisas) reciben cientos de usuarios diarios. La falta de bebederos públicos y sanitarios adecuados en estas zonas ha sido reportada como una limitación para el uso seguro del espacio (Secretaría de Salud del Valle, 2023).
- **Mercado municipal y plazas de abasto:** El mercado central de Zarzal, conocido como Galería Principal, está ubicado en el sector comprendido entre los barrios La Valvanera y Las Mercedes, cerca del Parque El Instituto. Este espacio concentra una alta actividad comercial y tránsito peatonal,

especialmente en horas de la mañana. La demanda de agua en este entorno se relaciona con la higiene alimentaria, limpieza de superficies y consumo directo (Live Valle del Cauca, 2023).

- Parques y espacios públicos: El Parque Central, el Parque de La Valvanera y el Bosque de Caracolés son puntos de encuentro comunitario. Aunque algunos cuentan con fuentes ornamentales, no todos tienen acceso a agua potable, lo que limita su funcionalidad como espacios seguros y saludables (Plan de Desarrollo Municipal, 2024–2027).
- Centros de atención en salud: El Hospital San Rafael y los puestos de salud en La Paila y Vallejuelo requieren suministro constante de agua para atención médica, limpieza y procesos clínicos. Cualquier interrupción en el servicio representa un riesgo sanitario directo (Contraloría Departamental del Valle, 2017).

Estas zonas deben ser priorizadas en los planes de inversión hídrica, tanto por su impacto poblacional como por su función social. La ausencia de bebederos públicos, sanitarios funcionales y puntos de abastecimiento alternativo en estos espacios representa una vulnerabilidad estructural.

1.2 HÁBITOS DE CONSUMO: AGUA EMBOTELLADA VS. FUENTES PÚBLICAS

El análisis de los hábitos de consumo en Zarzal revela una tendencia creciente hacia el uso de agua embotellada, especialmente en sectores urbanos de estratos 3 y 4. Según estudios de la UES Valle (2017) y el Instituto Nacional de Salud (INS, 2019), esta preferencia está motivada por:

- Percepción de riesgo frente a la calidad del agua de red, especialmente en barrios como El Progreso, La Cabaña y Pueblo Nuevo, donde se han reportado interrupciones frecuentes y baja presión.
- Ausencia de bebederos públicos en parques, escuelas y zonas deportivas, lo que obliga a los usuarios a adquirir agua embotellada para consumo inmediato.
- Campañas comerciales de marcas locales y nacionales que promueven el agua embotellada como “más segura” o “más pura”, sin que exista evidencia técnica que lo respalde en el contexto urbano de Zarzal.

En contraste, en zonas rurales como Vallejuelo, Limones y Quebrada Nueva, el consumo de agua se realiza principalmente a través de fuentes comunitarias (acueductos veredales, pozos y tanques de almacenamiento). Sin embargo, la auditoría ambiental de la Contraloría Departamental (2017) evidenció que en estas localidades el agua no cumple con los estándares físico-químicos y microbiológicos

exigidos por la Resolución 2115 de 2007, lo que incrementa el riesgo de enfermedades de origen hídrico.

1.2.1 Evaluación de factores logísticas

1.2.1.1 Puntos críticos de necesidad

Zarzal cuenta con una red de acueducto operada por Acuavalle S.A. E.S.P., que abastece a más del 97 % de la población urbana. El sistema se alimenta principalmente del embalse Sara Brut, una fuente regional que también provee a municipios como La Unión, Bolívar y Roldanillo. Sin embargo, la dependencia de una única fuente ha generado vulnerabilidades, como se evidenció en abril de 2025, cuando una falla geológica interrumpió el suministro a más de 19.000 usuarios (Ciudad Región Noticias, 2025).

Tabla 1. Puntos críticos de necesidad. Fuente: Elaboración propia.

Aspecto	Descripción	Información complementaria	Fuente
Presión del agua	La red urbana presenta presiones entre 20 y 40 psi, dependiendo de altitud y demanda horaria. En sectores elevados como El Jardín y San Fernando, se reportan presiones inferiores a 20 psi.	Presiones bajas pueden limitar el funcionamiento de dispensadores sin sistemas de bombeo o acumulación. Requiere evaluación hidráulica por zona.	Universidad Católica de Colombia, 2021
Calidad del agua	En la cabecera urbana se cumplen los parámetros de la Resolución 2115 de 2007. En zonas rurales como Vallejuelo, Quebrada Nueva y Limones, hay deficiencias en el tratamiento y operación, generando riesgo sanitario.	Las zonas rurales requieren refuerzo técnico y monitoreo constante. La calidad varía según fuente y temporada.	Contraloría Departamental del Valle, 2017

Proyectos en curso	El PAP-PDA financia estudios de fuentes alternas como pozos profundos y captaciones rurales, buscando aliviar la presión sobre el sistema Sara Brut y ampliar cobertura en corregimientos dispersos.	Oportunidad para integrar dispensadores en zonas con nuevos sistemas. Requiere articulación con proyectos en ejecución.	Gobernación del Valle del Cauca, 2023
---------------------------	--	---	---------------------------------------

La capacidad de distribución está limitada por la antigüedad de las redes, muchas de las cuales superan los 40 años de servicio y presentan problemas de infiltración, baja capacidad hidráulica y materiales obsoletos. En respuesta, se han ejecutado contratos de reposición de redes en sectores críticos del casco urbano (Acuavalle S.A. E.S.P., 2021).

Además, la Gobernación del Valle del Cauca ha impulsado estudios y diseños para un nuevo sistema de abastecimiento, con una inversión proyectada de \$17.000 millones, que busca diversificar las fuentes de captación y mejorar la resiliencia del sistema (Gobernación del Valle del Cauca, 2016).

1.2.1.2 Espacios Físicos Viables para la Instalación

La instalación de dispensadores de agua potable en espacios públicos requiere una evaluación multidimensional que considere aspectos técnicos, urbanísticos, sociales y ambientales. En Zarzal, se identifican varios tipos de espacios con alto potencial de intervención:

Tabla 2. Espacios físicos viables para la instalación. Fuente: Elaboración propia.

Elemento urbano	Descripción	Información complementaria	Fuente
Aceras y mobiliario urbano	Barrios como La Valvanera, Bolívar, Las Mercedes y Ciudad Jardín cuentan con aceras de más de 2 metros, pavimentadas y con luminarias funcionales. El mobiliario urbano puede integrarse estéticamente con los dispensadores.	Permite la instalación sin afectar la movilidad ni seguridad. Ideal para zonas peatonales con alto tránsito.	Alcaldía de Zarzal, 2023

Postes de servicios públicos	Postes metálicos y de concreto distribuidos en zonas de alta afluencia pueden servir como soporte estructural para dispensadores verticales, si se cumplen normas de carga, aislamiento y accesibilidad.	Requiere verificación técnica previa. Opción eficiente para instalación rápida en zonas consolidadas.	Gobernación del Valle del Cauca, 2023
Parques y zonas verdes	Espacios como Parque Central, La Valvanera, Bosque de Caracolés y Las Palmas tienen senderos, zonas de descanso y alta afluencia comunitaria. Son ideales para dispensadores en puntos de encuentro.	Debe considerarse diseño paisajístico, accesibilidad universal y mantenimiento preventivo.	Live Valle del Cauca, 2023
Equipamientos deportivos	La Villa Olímpica, el Kartódromo y canchas barriales tienen áreas libres que pueden adaptarse para fuentes de agua. Alta concentración de población joven y deportistas.	Oportunidad para promover hidratación segura en espacios de actividad física.	Secretaría de Salud del Valle, 2023
Zonas educativas	I.E. Simón Bolívar, I.E. Efraín Varela Vaca y la Normal Superior tienen patios amplios y zonas comunes aptas para dispensadores. Beneficia a estudiantes y docentes.	Mejora condiciones de salud e higiene escolar. Requiere coordinación con directivas institucionales.	Instituciones educativas, 2023

1.3 RESTRICCIONES: LIMITACIONES TÉCNICAS PARA LA INSTALACIÓN DE DISPENSADORES DE AGUA POTABLE EN ZARZAL, VALLE DEL CAUCA

1.3.1 Infraestructura Hidráulica y Capacidad Operativa

1.3.1.1 Red de Acueducto con Limitaciones Estructurales

La red de acueducto de Zarzal, operada por Acuavalle S.A. E.S.P., presenta tramos con más de cuatro décadas de antigüedad, contruidos con materiales como asbesto cemento y hierro galvanizado. Estos materiales han perdido eficiencia hidráulica, presentan corrosión interna y son propensos a rupturas, lo que limita la presión y continuidad del servicio en varios sectores urbanos y rurales (Acuavalle S.A. E.S.P., 2021).

En zonas elevadas como El Jardín y San Fernando, se han registrado presiones inferiores a 20 psi, lo que impide el funcionamiento óptimo de dispensadores sin sistemas complementarios de bombeo o acumulación (Universidad Católica de Colombia, 2021). Esta condición técnica exige una evaluación hidráulica previa en cada punto de instalación para garantizar la operatividad del sistema.

- **Capacidad de Tratamiento y Proyección Demográfica**

La planta de tratamiento actual está diseñada para atender la demanda de la población urbana, pero no contempla incrementos derivados de nuevas instalaciones públicas. El Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos aprobado en 2023 por Acuavalle y la CVC proyecta una expansión de la infraestructura para atender el crecimiento poblacional estimado a 25 años, incluyendo la construcción de una nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (Gobernación del Valle del Cauca, 2023).

Sin embargo, mientras se ejecutan estas obras, la capacidad de tratamiento y distribución sigue siendo limitada, lo que restringe la instalación de dispositivos que aumenten el consumo en zonas de alta densidad.

1.3.2 Limitaciones Técnicas en Espacios Públicos

1.3.2.1 Ausencia de Conexiones Hidrosanitarias

Muchos espacios públicos identificados como viables —como parques, zonas deportivas y aceras amplias— carecen de conexiones hidrosanitarias cercanas. Esto implica obras civiles adicionales para extender redes de agua y desagüe, lo que incrementa los costos, requiere permisos especiales y puede afectar la programación de ejecución (Alcaldía de Zarzal, 2023; Acuerdo No. 607 de 2024). Además, la normativa local exige que toda instalación pública cuente con sistemas de drenaje adecuados para evitar acumulación de agua, lo que representa un reto técnico en zonas con pendiente o pavimento irregular.

1.3.2.2 Interferencia con Redes Técnicas Existentes

La coexistencia de redes de telecomunicaciones, energía eléctrica y gas domiciliario en zonas urbanas genera restricciones técnicas para la instalación de nuevos dispositivos. La normativa exige distancias mínimas entre redes y estructuras, así como estudios de interferencia electromagnética y carga estructural, lo que limita el número de puntos viables sin incurrir en riesgos eléctricos o estructurales (Gobernación del Valle del Cauca, 2023).

1.3.3 Riesgos de Contaminación y Mantenimiento

1.3.3.1 Vulnerabilidad Sanitaria

La exposición directa de dispensadores en espacios abiertos sin sistemas de protección contra vandalismo, animales o residuos puede comprometer la calidad del agua. Esto exige diseños con válvulas de cierre automático, filtros de partículas, estructuras de acero inoxidable y sistemas de monitoreo, lo cual encarece la implementación y requiere mantenimiento especializado (Contraloría Departamental del Valle del Cauca, 2017).

Además, la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Salud establece parámetros estrictos para la calidad del agua en sistemas públicos, lo que obliga a realizar controles periódicos de cloro residual, turbidez y presencia de coliformes.

1.3.3.2 Mantenimiento Técnico Especializado

La operación continua de dispensadores requiere mantenimiento técnico periódico, incluyendo limpieza de filtros, revisión de válvulas, calibración de sensores y control de fugas. Zarzal no cuenta actualmente con una unidad municipal especializada en mantenimiento de dispositivos hidráulicos públicos, lo que representa una limitación operativa significativa (Plan Municipal de Gestión del Riesgo, 2024).

La falta de personal capacitado y de protocolos de mantenimiento preventivo puede derivar en fallas recurrentes, desperdicio de agua y percepción negativa por parte de la comunidad.

1.4 RESTRICCIONES: NORMATIVAS LEGALES PARA LA INSTALACIÓN DE DISPENSADORES DE AGUA POTABLE EN ZARZAL

1.4.1 Marco Jurídico Municipal y Departamental

1.4.1.1 Competencia de la Administración Municipal

La instalación de infraestructura pública como dispensadores de agua debe ajustarse al marco normativo definido por el Concejo Municipal de Zarzal, que regula el uso del espacio público, la ejecución de obras civiles y la prestación de servicios domiciliarios. El Acuerdo No. 607 de 2024 establece que toda intervención en el espacio público debe estar alineada con el Plan de Desarrollo Municipal “Zarzal

Siempre Presente” 2024–2027, y contar con aprobación técnica de la Secretaría de Planeación (Concejo Municipal de Zarzal, 2024).

Además, el Decreto 180.03.03.697 de la Alcaldía de Zarzal establece medidas para garantizar el orden público, incluyendo restricciones de circulación y uso de espacios públicos en horarios nocturnos, lo que puede limitar el acceso a dispensadores en ciertos sectores durante la noche.

1.4.1.2 Normas Técnicas de Servicios Públicos

La instalación de dispensadores debe cumplir con lo estipulado en la Ley 142 de 1994 (Ley de Servicios Públicos Domiciliarios), que exige que toda conexión a la red de acueducto esté autorizada por el prestador del servicio, en este caso Acuavalle S.A. E.S.P. Además, se deben respetar las condiciones técnicas de presión, caudal y calidad del agua, así como los procedimientos de facturación y mantenimiento.

La Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Salud establece los requisitos de calidad del agua para consumo humano, incluyendo parámetros microbiológicos, físicos y químicos. Cualquier dispensador instalado en espacio público debe garantizar el cumplimiento de estos estándares mediante sistemas de filtración, protección sanitaria y monitoreo periódico.

1.4.2 Normativas sobre Espacio Público y Urbanismo

1.4.2.1 Uso y Ocupación del Espacio Público

El Código Nacional de Policía (Ley 1801 de 2016) establece que toda ocupación del espacio público debe ser autorizada por la autoridad competente y no puede interferir con la movilidad, seguridad y accesibilidad de los ciudadanos. En Zarzal, esta competencia recae en la Secretaría de Gobierno y la Inspección de Policía, quienes deben validar que los dispensadores no obstruyan aceras, rampas, zonas de tránsito ni mobiliario urbano.

Asimismo, el Decreto 1504 de 1998 sobre el manejo del espacio público en el ordenamiento territorial exige que toda infraestructura instalada en zonas urbanas cumpla con criterios de diseño paisajístico, funcionalidad y sostenibilidad.

1.4.2.2 Normas de Accesibilidad Universal

La Ley 1618 de 2013 y la Ley 1346 de 2009 (Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad) obligan a que toda infraestructura pública sea accesible para personas con movilidad reducida. Esto implica que los dispensadores deben tener una altura adecuada, sistemas de activación accesibles, señalización táctil y rutas de acceso libres de obstáculos.

1.4.3 Normativas Ambientales y de Gestión del Riesgo

1.4.3.1 Protección de Fuentes Hídricas

La instalación de dispensadores en zonas cercanas a fuentes hídricas, parques naturales o áreas de protección ambiental debe cumplir con lo estipulado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), que regula el uso del suelo y la protección de ecosistemas. El incumplimiento de estas normas puede acarrear sanciones administrativas y la suspensión de obras.

1.4.3.2 Plan Municipal para la Gestión de los Riesgos

El Plan Municipal para la Gestión de los Riesgos del municipio de Zarzal establece que toda infraestructura pública debe ser revisada en términos de vulnerabilidad ante eventos naturales, vandalismo o fallas técnicas. Estos dispensadores deben tener sistemas de protección estructural, algunos protocolos de mantenimiento y planes de emergencia ante interrupciones del servicio o vandalismo por parte de personas maliciosas del municipio.

1.4.4 Normativas de Seguridad y Orden Público Municipal

1.4.4.1 Restricciones Horarias

Según el Decreto Municipal vigente, Zarzal mantiene restricciones de circulación nocturna para menores de edad y motociclistas con parrillero hombre, como medida preventiva ante situaciones de inseguridad. Estas restricciones se aplican entre las 9:00 p.m. y las 5:00 a.m., y limitan el uso de espacios públicos como parques, plazas y zonas deportivas durante ese horario.

Esto implica que los dispensadores ubicados en dichas zonas podrían tener un horario restringido de funcionamiento, o requerir sistemas de cierre automático para evitar el uso indebido fuera del horario permitido.

1.4.4.2 Brecha identificativa

En el municipio de Zarzal, Valle del Cauca, se evidencia una ausencia crítica de fuentes públicas de agua potable en espacios de alta afluencia ciudadana y escenarios deportivos como el Estadio Municipal, el Coliseo, la Ciclovía, parques barriales y zonas comerciales. Esta carencia limita el acceso equitativo al agua en contextos donde la hidratación es vital, especialmente durante actividades físicas, recreativas y comunitarias.

Aunque el sistema de acueducto urbano alcanza una cobertura del 97,3 % (Superintendencia de Servicios Públicos, 2020) y el servicio de recolección de residuos sólidos cubre el 95,7 % de la población, no existen puntos de acceso

público gratuito al agua potable en espacios abiertos. Esta situación representa una brecha estructural en la infraestructura urbana, que afecta tanto la salud pública como el derecho fundamental al agua.

La falta de fuentes públicas de agua potable en espacios deportivos y de alta circulación representa una vulneración del derecho fundamental al agua, consagrado en el artículo 365 de la Constitución Política de Colombia y respaldado por la Observación General N.º 15 del Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de la ONU (ONU, 2002).

En contextos de actividad física, la deshidratación puede generar riesgos graves como golpes de calor, fatiga muscular, hipotensión y descompensaciones metabólicas. Estos riesgos se agravan en poblaciones vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades crónicas, quienes frecuentan estos espacios sin acceso garantizado a agua potable.

El Informe de Auditoría Ambiental de la Contraloría Departamental del Valle del Cauca evidenció que, aunque Zarzal cuenta con cobertura de acueducto, no existen fuentes públicas de agua potable en zonas de alta circulación, lo que limita el ejercicio pleno del derecho al agua en el espacio público (Contraloría Departamental del Valle del Cauca, 2017).

La ausencia de fuentes públicas de agua ha generado una dependencia creciente del agua embotellada, lo que contribuye al incremento del uso de plásticos de un solo uso en el municipio. Según un estudio de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, el 30 % de la población colombiana no tiene acceso cercano a fuentes públicas de agua, lo que incrementa significativamente el consumo de envases plásticos y, por ende, la generación de residuos sólidos (Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2025).

Este patrón de consumo tiene consecuencias ambientales directas:

- Aumento de residuos sólidos no biodegradables
- Saturación de los sistemas de recolección de basuras
- Contaminación de fuentes hídricas por lixiviados plásticos

En Zarzal, donde el sistema de recolección de residuos cubre el 95,7 % de la población (Superintendencia de Servicios Públicos, 2020), el incremento de plásticos representa una presión adicional sobre la gestión ambiental urbana, especialmente en zonas de alta afluencia como el Parque Principal y el Malecón del Río La Paila.

El Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) 2023, aprobado por la Gobernación del Valle del Cauca, contempla mejoras en el sistema de tratamiento de aguas residuales, pero no incluye estrategias para la instalación de fuentes públicas de agua potable (Gobernación del Valle del Cauca, 2023). Esta omisión revela una falta de articulación entre salud pública, infraestructura urbana y sostenibilidad ambiental.

Además, la reciente falla en el sistema de tuberías del embalse Sara Brut, que dejó sin agua a más de 19.000 usuarios en Zarzal y municipios vecinos, evidencia la vulnerabilidad del sistema centralizado y la necesidad urgente de alternativas descentralizadas como puntos de hidratación pública (El País, 2025; 90 Minutos, 2025).

Según Vallecaucana de Aguas, el estudio de factibilidad para fuentes alternas de abastecimiento en Zarzal tiene un costo estimado de \$630 millones, y beneficiaría a más de 55.000 habitantes del municipio (Gobernación del Valle del Cauca, 2016). Sin embargo, este estudio no contempla la instalación de dispensadores públicos de agua potable en espacios abiertos, lo que deja sin respuesta una necesidad ciudadana urgente.

La ausencia de fuentes públicas de agua potable en zonas de alta afluencia y demanda deportiva en Zarzal representa una problemática multidimensional que afecta la salud pública, el ejercicio de derechos fundamentales, la sostenibilidad ambiental y la equidad territorial. A pesar de contar con una cobertura de acueducto superior al 97 % (Superintendencia de Servicios Públicos, 2020), el municipio carece de infraestructura que permita el acceso gratuito, directo y universal al agua en espacios abiertos, lo que limita el bienestar de la ciudadanía y perpetúa desigualdades en el uso del espacio público.

La evidencia técnica y estadística muestra que esta carencia no solo expone a la población a riesgos de deshidratación y enfermedades derivadas del mismo, especialmente en contextos deportivos y recreativos, sino que también contribuye al incremento del consumo de plásticos de un solo uso, generando altos impactos negativos sobre el medio ambiente urbano (Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2025). En adición a ello, la falta de articulación entre los planes de saneamiento, la gestión del recurso hídrico y la planificación urbana revela una brecha institucional que debe ser abordada con enfoque intersectorial y participativo.

La reciente emergencia en el sistema de abastecimiento de agua potable del embalse Sara Brut, ubicado en Bolívar, Valle del Cauca, que afectó a más de 19.000 usuarios (El País, 2025), reafirma la necesidad de alternativas descentralizadas y resilientes, como la instalación de dispensadores públicos de agua potable en puntos estratégicos del municipio. Esta solución no solo da respuesta a una necesidad, sino que entra en juego también con los principios de sostenibilidad y justicia ambiental, además de que permite garantizar el servicio a todos los habitantes del municipio. Es importante destacar de forma insistente que esta estrategia va de la mano con la implementación de otro tipo de planes de infraestructura que permitan tener otra opción de abastecimiento en caso de que Sara Brut falle nuevamente, ya que la posibilidad de una eventualidad así sigue siendo alta.

En este orden de ideas, se muestra que es más que necesario avanzar hacia la formulación de objetivos estratégicos claros y medibles, estos objetivos deben

permitir el diseño y la implementación de una propuesta técnica adecuada para la instalación de fuentes hídricas públicas de agua potable en Zarzal. Estos objetivos deben considerar diversos criterios de cobertura territorial, eficiencia operativa, participación comunitaria y sostenibilidad financiera, con el fin de garantizar que el acceso al agua en el espacio público sea un derecho y no un privilegio.

2 ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS TÉCNICOS, AMBIENTALES Y URBANOS QUE ORIENTEN LA UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE DISPENSADORES PÚBLICOS DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE ZARZAL.

La localización estratégica de equipamientos urbanos, como los dispensadores públicos de agua potable, exige una aproximación metodológica que permita la articulación de criterios técnicos, sociales, ambientales y operativos. Esta selección no puede ser arbitraria ni al azar: es fundamental que esta selección responda a las condiciones específicas del territorio, a las necesidades de la población y a los estándares de sostenibilidad y equidad urbana. Siguiendo esa línea de ideas, este capítulo presenta los criterios y su correspondiente análisis, que orientarán la propuesta de localización en el municipio de Zarzal, los cuales han sido seleccionados a partir de una revisión exhaustiva y rigurosa de la literatura especializada.

Múltiples investigaciones señalan cómo “La efectividad de los proyectos de infraestructura urbana radica, en la mayoría de los casos, en la calidad de los criterios empleados para localizarlos.” Hernández Bonilla (2010), cuyo estudio alude a la “participación ciudadana como eje central en el concepto de diseño urbano”, o Rodríguez y Rincón (2018), quienes afirman que “debe existir un correlato entre los equipamientos y determinados elementos propios del entorno, así como con su trama religiosa y social”. En contraste, algunos organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud y ONU-Hábitat (2021) establecieron lineamientos técnicos para integrar la salud pública en la planificación territorial, enfatizando la seguridad sanitaria como criterio prioritario.

La revisión también une algunos enfoques ambientales, como los propuestos por Mendoza Ludeña (2024), quien en su estudio, analiza el impacto del desarrollo urbano sobre la sostenibilidad hídrica, y por el Ministerio de Vivienda (2022), que promueve el diseño urbano sensible al agua mediante sistemas de drenaje sostenible (SUDS). En el plano técnico-operativo, autores como Sánchez y Vergara (2021) y Caparrós Pérez (2017) abordan la viabilidad financiera y física de los proyectos, mientras que estudios recientes de la Universidad Católica de Colombia (2021) aportan datos específicos sobre presión hidráulica, calidad del agua y comportamiento de la cuenca del río La Paila en Zarzal.

Los criterios seleccionados se presentan en la tabla a continuación, junto con sus respectivas fuentes, autores y año de publicación. Esta sistematización permite evidenciar el peso conceptual y práctico de cada criterio propuesto en este proyecto, así como su coherencia para el contexto local. Asimismo, la pluralidad de enfoques –por ejemplo, la planificación participativa y la compatibilidad normativa así como la accesibilidad vial– configura una mirada integral que fortalece la propuesta metodológica del proyecto.

El primer paso consiste en la identificación de estos criterios que posteriormente se agruparán temáticamente, validarán con expertos y definirán escalas. Este proceso será la base para la construcción de una herramienta de toma de decisiones robusta con alto peso decisivo que se utilizará en el siguiente capítulo para la micro localización de dispensadores. El presente capítulo no solo brinda el marco conceptual requerido, sino que establece las bases técnicas para una intervención urbana coherente, equitativa y sostenible.

Tabla 3. Autor vs Criterio. Fuente: Elaboración propia.

Revista o Fuente	Autor	Año	Nombre del artículo	Criterio identificado
Revista INVI	Hernández Bonilla, M.	2021	Participación ciudadana en el diseño urbano	Aceptación social y participación
Revista de Arquitectura	Rodríguez & Rincón	2018	Percepción ciudadana sobre infraestructura urbana	Articulación con el entorno urbano
OMS / ONU-Hábitat	OMS & ONU-Hábitat	2021	Integrar la salud en la planificación urbana	Seguridad sanitaria
Revista Visión de Futuro	Mendoza Ludeña, L.	2024	Evaluación crítica del desarrollo sostenible	Impacto ambiental positivo
Repositorio USTA	Sánchez & Vergara	2021	Viabilidad técnica y financiera de proyectos	Viabilidad operativa
Universidad Católica de Colombia	UCC	2021	Estudio hidrológico de Zarzal	Calidad del agua y presión hidráulica
Universidad Distrital / U. Caldas	Correal & García	2023	Análisis de criterios para incluir disponibilidad de agua en el desarrollo urbano	Disponibilidad hídrica y cobertura territorial
Guía SUDS – Min Vivienda / DNP	Ministerio de Vivienda	2022	Guía metodológica para sistemas urbanos de drenaje sostenible	Diseño urbano sensible al agua (WSUD)
Revista Ciudades, Estados y Política	Mesa García, S. C.	2021	Medición de criterios de sostenibilidad urbana	Integración con infraestructura existente

Revista Ambiente & Urbanismo	Duque Franco & Montoya Garay	2021	Urbanización y cambio climático en ciudades intermedias	Vulnerabilidad climática
Revista Ingeniería y Sociedad	Caparrós Pérez, D.	2017	Viabilidad para generar territorios sostenibles	Compatibilidad con usos del suelo
Manual de Construcción Sostenible (Cali)	Alcaldía de Santiago de Cali	2022	Diseño de áreas comunes y manejo de agua pluvial	Potencial de recolección de aguas lluvias
Revista Gestión y Ambiente	Ramírez Pacheco et al.	2025	Evaluación multicriterio para localización de equipamientos públicos	Accesibilidad peatonal y conectividad vial
CEPAL / U. Nacional	Angarita & Sandoval	2022	Herramientas SIG para localización de equipamientos urbanos	Disponibilidad de espacio físico
Revista Planeación y Desarrollo	Linares, S.	2026	Soluciones espaciales a problemas sociales urbanos	Proximidad a zonas de alta afluencia
Universidad de Medellín	Corrales & Mesa	2008	Evaluación de factibilidad legal, técnica y financiera	Factibilidad legal y normativa local

La propuesta metodológica tiene un factor fundamental que es la identificación de criterios. Los mismos serán el insumo para la ubicación de dispensadores públicos de agua en el municipio de Zarzal. Estos criterios establecen parámetros técnicos, sociales, ambientales y operativos que orientan la toma de decisiones que aseguran que las soluciones propuestas respondan a las condiciones reales del territorio y a las necesidades de la población.

Para la selección de estos criterios, fue relevante realizar una revisión de literatura científica, técnica y normativa, incluyendo artículos científicos, estudios de caso y documentos institucionales. Esta revisión logra identificar dieciséis criterios bastante utilizados en proyectos de localización de equipamientos urbanos, cada uno de los cuales se presenta en la Tabla 1. Junto a cada criterio se identifica su fuente, autor y año de publicación y nombre del estudio, lo cual permite evidenciar su probada validez y su pertinencia para el caso colombiano.

Con la clara intención de facilitar el análisis y la validación de los expertos, los criterios fueron agrupados en cuatro categorías:

- **Técnicos**, estos hacen referencia a las condiciones físicas, normativas y operativas necesarias para la instalación de los dispensadores, incluyendo la viabilidad estructural, la compatibilidad con el uso del suelo y la disponibilidad de espacio físico.
- **Sociales**, que consideran aspectos relacionados con la apropiación comunitaria, la accesibilidad peatonal, la conectividad vial y la cercanía a zonas de alta afluencia.
- **Ambientales**, que integran variables como el impacto ecológico, la sensibilidad urbana frente al agua, la recolección de aguas lluvias y la vulnerabilidad climática.
- **Operativos**, que abordan la calidad del agua, la presión hidráulica, la cobertura territorial, la seguridad sanitaria y la integración con infraestructura existente.

Esta agrupación permite estructurar el proceso de validación con expertos, quienes evaluarán cada criterio en función de su relevancia para el proyecto, su viabilidad en el contexto de Zarzal y el nivel de consenso técnico que genera. La matriz de validación que se presenta a continuación servirá como instrumento para este proceso, y sus resultados permitirán seleccionar los criterios más robustos para la construcción de la herramienta de toma de decisiones multicriterio (MCDM).

Criterios técnicos:

Tabla 4. Criterios técnicos. Fuente: Elaboración propia.

Criterio identificado	Fuente
Viabilidad operativa	Sánchez & Vergara (2021) – Repositorio USTA
Calidad del agua y presión hidráulica	Universidad Católica de Colombia (2021)
Compatibilidad con usos del suelo	Universidad Católica de Colombia (2021)
Disponibilidad de espacio físico	Angarita & Sandoval (2022) – CEPAL / U. Nacional
Factibilidad legal y normativa local	Corrales & Mesa (2008) – U. de Medellín

Criterios sociales:

Tabla 5. Criterios sociales. Fuente: Elaboración propia.

Criterio identificado	Fuente
Aceptación social y participación	Hernández Bonilla (2010) – Revista INVI
Articulación con el entorno urbano	Rodríguez & Rincón (2018) – Revista de Arquitectura

Proximidad a zonas de alta afluencia	Linares (2016) – Revista Planeación y Desarrollo
Accesibilidad peatonal y conectividad vial	Ramírez Pacheco et al. (2025) – Revista Gestión y Ambiente

Criterios ambientales:

Tabla 6. Criterios ambientales. Fuente: Elaboración propia.

Criterio identificado	Fuente
Impacto ambiental positivo	Mendoza Ludeña (2024) – Revista Visión de Futuro
Diseño urbano sensible al agua (WSUD)	Min Vivienda / DNP (2022) – Guía SUDS
Potencial de recolección de aguas lluvias	Alcaldía de Cali (2022) – Manual de Construcción Sostenible
Vulnerabilidad climática	Duque Franco & Montoya Garay (2021) – Revista Ambiente & Urbanismo

Criterios operativos:

Tabla 7. Criterios operativos. Fuente: elaboración propia.

Criterio identificado	Fuente
Seguridad sanitaria	OMS & ONU-Hábitat (2021)
Disponibilidad hídrica y cobertura territorial	Correal & García (2023) – U. Distrital / U. Caldas
Integración con infraestructura existente	Mesa García (2021) – Revista Ciudades, Estados y Política

2.1 SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

La localización adecuada de equipamientos urbanos, como los dispensadores públicos de agua potable, necesita no solo de unos bien criterios bien definidos, sino también algunas herramientas metodológicas que logren integrar, ponderar y evaluar dichos criterios de forma adecuada. En ese orden de ideas, las herramientas de toma de decisiones multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) se posicionan como instrumentos fundamentales e importantes en la planificación urbana actual, facilitando la resolución de problemas difíciles que involucran múltiples variables, actores y escenarios.

La revisión de artículos científicos demuestra que estas herramientas han sido las favoritas en proyectos de infraestructura, movilidad, salud pública y gestión ambiental urbana, esto gracias a su capacidad para mezclar datos cuantitativos y

cualitativos, la adición de juicios expertos y la generación de resultados comparables entre las alternativas que fueron evaluadas. Herranz-Pascual et al. (2013) destacan el uso del Analytic Hierarchy Process (AHP por sus siglas en inglés) como una técnica acertada e irremplazable para la priorización de criterios en planes de acción municipales. Por su parte, Mendoza-Mendoza et al. (2019) proponen una metodología que combina AHP difuso y TOPSIS para seleccionar la mejor opción de localización comercial, demostrando la facilidad con la que se aplica en contextos urbanos con múltiples atributos.

La literatura normalmente muestra que la mezcla de herramientas multicriterio con sistemas de información geográfica (GIS) potencia de forma significativa la calidad del análisis espacial. Jaime Martínez (2024), en uno de sus estudios llevado a cabo en Colombia, demuestra cómo esta integración logra vincular criterios técnicos con datos territoriales, facilitando en gran medida la selección de sitios adecuados para la infraestructura pública usando el análisis espacial multicriterio. Esta sinergia metodológica resulta especialmente útil en municipios como Zarzal, donde la heterogeneidad territorial exige soluciones adaptadas a cada sector y situación.

Además, diversos enfoques participativos como los propuestos por UN-Habitat (2001) amplían enormemente el alcance de las herramientas MCDM al usar al mismo tiempo dimensiones sociales, como la percepción ciudadana, la equidad territorial y la legitimidad institucional, transformándose estos en criterios cualitativos. Estas herramientas permiten no solo evaluar ciertas alternativas desde una perspectiva técnica, sino también fortalecer los algunos procesos de gobernanza urbana y asegurando que las decisiones respondan a las necesidades reales de la comunidad.

En la *Tabla 8* se presentan algunas de las herramientas más empleadas en la literatura, también contienen su aplicación principal, fuente, año de publicación y relevancia para el presente proyecto. Esta categorización será útil como base para seleccionar la herramienta más adecuada, o una combinación de ellas, que permita avanzar hacia una propuesta metodológica robusta, contextualizada y técnicamente viable.

Tabla 8. Herramientas multicriterio. Fuente: Elaboración propia.

Herramienta / Método	Aplicación principal	Fuente / Autor(es)	Año	Relevancia para el proyecto
AHP (Analytic Hierarchy Process)	Priorización de criterios y evaluación de alternativas	Herranz-Pascual et al.	2013	Alta: permite ponderar criterios validados con expertos
AHP Difuso + TOPSIS	Selección de alternativas con múltiples atributos	Mendoza-Mendoza et al.	2019	Alta: útil para escenarios con criterios contradictorios

GIS + MCDM	Localización espacial integrada	Jaime Martínez – U. Nacional	2024	Alta: vincula criterios con mapas y datos territoriales
Caja de herramientas participativas	Gestión urbana con enfoque social	UN-Habitat	2001	Alta: fortalece procesos de consulta y legitimidad comunitaria
VIKOR	Evaluación de alternativas bajo conflicto	Ramírez Pacheco et al.	2025	Media: útil para escenarios con criterios divergentes
PROMETHEE	Ordenamiento de alternativas por preferencia	Brans & Vincke	1985	Media: útil en contextos con múltiples actores
ELECTRE	Evaluación por sobre clasificación	Roy & Vincke	1991	Baja: requiere alto nivel técnico y datos precisos
SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique)	Valoración directa de atributos	Edwards & Barron	1994	Media: útil para proyectos con criterios cuantificable
BOCR (Benefits, Opportunities, Costs, Risks)	Evaluación integral de alternativas considerando dimensiones estratégicas	Sepúlveda & Vega – Univ. del Valle Zarzal	2015	Alta: permite balancear beneficios, riesgos y costos en decisiones de localización
MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique)	Valoración cualitativa de alternativas	Bana e Costa et al.	1997	Media: útil para decisiones con juicios subjetivos estructurados
COPRAS (Complex Proportional Assessment)	Evaluación proporcional de alternativas	Zavadskas et al.	2008	Media: útil para proyectos con múltiples atributos cuantificable
DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)	Análisis de relaciones entre criterios y su influencia	Gabus & Fontela	1973	Alta: útil para identificar interdependencias entre criterios

				antes de aplicar MCDM principal
--	--	--	--	------------------------------------

La planificación territorial y la ubicación de instalaciones urbanas comúnmente dependen de metodologías que pueden abarcar múltiples aspectos del problema: técnico, social, ambiental, económico y estratégico. En las circunstancias descritas en este proyecto actual, dirigido a la instalación de dispensadores públicos de agua potable en el municipio de Zarzal, en la mayoría de los casos se deben tener en cuenta criterios diferentes y conflictivos. Por esta razón, la revisión de herramientas multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) es más que un paso para asegurar la solidez metodológica, la transparencia de la selección y la relevancia contextual de las decisiones tomadas.

Se ha informado extensamente que las herramientas MCDM están disponibles para resolver algunos problemas complejos de ubicación urbana desde una perspectiva estructurada que ayuda en la ponderación de criterios, la comparación de alternativas y el juicio de expertos. Como Zavadskas et al. (2008), comúnmente es útil solo para casos donde las características de su elección no pueden evaluarse de forma separada. En esta situación, el método es útil solo cuando se revisa una combinación de diferentes perspectivas. La revisión de la literatura en este estudio investiga los métodos AHP, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE, ELECTRE, SMART, COPRAS, MACBETH, DEMATEL y BOCR que se utilizan para este propósito.

Basado en el análisis de sus características, dificultad y la consistencia en el análisis espacial, así como la aplicación contextual en el entorno urbano local, se encuentra que la combinación difusa AHP + TOPSIS + BOCR proporciona una solución metodológica adecuada y amplia para cumplir con los requisitos de este proyecto.

a) AHP difuso: ponderación de criterios bajo incertidumbres:

El método AHP (Proceso de Jerarquía Analítica), desarrollado por Saaty (1980), ha sido utilizado con frecuencia para la ponderación de los criterios en proyectos de infraestructura urbana. Sin embargo, su versión tradicional presenta algunas problemáticas cuando las evaluaciones de los expertos son imprecisos o subjetivas. Para superar esta limitación, se adopta el enfoque AHP difuso, el cual permite incorporar la incertidumbre en los procesos de evaluación humana a través de la lógica difusa.

Hernández Santibáñez et al. (2017), en un estudio aplicado en la Universidad del Valle, demostraron que el AHP difuso mejora la precisión en la ponderación de criterios cuando los expertos no pueden asignar valores exactos, sino rangos de preferencia. Esta característica es especialmente importante en Zarzal, donde los criterios técnicos (como presión hidráulica o disponibilidad hídrica) deben ser evaluados junto con criterios sociales (como aceptación comunitaria o accesibilidad peatonal), los cuales suelen tener una carga subjetiva significativa.

b) TOPSIS: evaluación de alternativas por cercanía a la solución ideal

Una vez ponderados los criterios, es necesario realizar una comparación de las alternativas de localización disponibles. Para ello, se selecciona el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), desarrollado por Hwang y Yoon (1981), el cual permite ordenar las alternativas según su proximidad a una solución ideal y su distancia respecto a una solución no deseable.

Este enfoque ha sido validado en diversos estudios de localización urbana y selección de proveedores, como el desarrollado por Osorio Gómez et al. (2018), quienes integraron AHP difuso y TOPSIS con la intención de evaluar riesgos asociados a la calidad en procesos logísticos. En el contexto del municipio objeto de estudio, TOPSIS permite comparar sitios que son potenciales para la instalación de dispensadores, teniendo en cuenta los atributos positivos (como cobertura poblacional o infraestructura disponible) y negativos (como vulnerabilidad climática o costos operativos), generando una lista objetiva de alternativas.

c) BOCR: evaluación estratégica integral

El enfoque de la metodología multicriterio BOCR es sólida e integrada para la toma de decisiones multidimensionales en el área urbana. La cual forma una estructura en donde se consideran los pros, los contras, las consecuencias económicas y las amenazas de cualquiera de las alternativas o enfoques que se combinan, con el fin de lograr una elección ponderada que no solo cumpla con criterios técnicos, sino también con criterios estratégicos.

Para proyectos de ubicación espacial urbana, como aquellos que instalan dispensadores de agua potable en la hidratación comunitaria municipal, que constituyen mucho más que un análisis convencional, se puede adoptar BOCR para una ponderación de múltiples variables de valores sociales, ambientales y operativos. Se ha informado en varios estudios que es relevante para los procesos de planificación territorial, presentando una visión multifacética y holística que aclara la viabilidad técnica y el impacto comunitario (Saaty, 2001; Quintero-González et al., 2021).

El enfoque de criterios múltiples — BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos) — que se utilizará en este estudio se basa en su capacidad probada para abordar problemas complejos de decisión en contextos urbanos, caracterizados por características multivariadas, restricciones técnicas y altos valores de incertidumbre. Esto permite la reestructuración de jerarquías de criterios, ponderando prioridades a través de juicios de expertos y la síntesis de alternativas o estrategias de manera transparente y replicable, lo cual se aplica particularmente a los procesos de ubicación territorial.

Ciertos escenarios también han sido validados, a través de varios estudios, en entornos urbanos y de infraestructura. Por ejemplo, Rodríguez Negrete et al. (2020) demuestran que un enfoque BOCR ayuda en la toma de decisiones participativa y

basada en evidencia, ya que involucra dimensiones sociales, regulatorias y ambientales que complementan la eficiencia técnica. Asimismo, Montesinos Valera (2011) lo aplica exitosamente en la selección de carteras de proyectos ferroviarios, demostrando su utilidad para balancear criterios operativos con objetivos de equidad y sostenibilidad.

En el estudio actual, se adoptó el enfoque BOCR para evaluar las alternativas para la microlocalización de dispensadores públicos de agua potable considerando una lógica integral, ya que la solución considera la viabilidad técnica y económica junto con la relevancia social, el impacto ecológico y la oportunidad estratégica en cada ubicación.

Su flexibilidad metodológica y adaptación local lo hacen ideal para la planificación urbana multicriterio. Al realizar esta revisión metodológica, se han identificado las fortalezas y limitaciones de los enfoques multicriterio primarios en la literatura especializada.

Este análisis indica que se eligió el AHP difuso + BOCR como el mejor ajuste para lograr los objetivos del proyecto, ya que permite:

- Ponderar criterios bajo condiciones de incertidumbre (AHP difuso)
- Comparar alternativas de forma objetiva y estructurada.
- Evaluar estratégicamente las opciones considerando beneficios, oportunidades, costos y riesgos (BOCR)

Este duo metodológico garantiza un enfoque integral, riguroso y contextualizado, que permitirá formular una propuesta de localización técnicamente viable, socialmente pertinente y estratégicamente sostenible para el municipio de Zarzal.

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CANTIDAD Y UBICACIÓN DE DISPENSADORES

La planificación territorial contemporánea ha enfrentado desafíos cada vez más complejos, estos son derivados de la expansión urbana, la desigualdad en el acceso a servicios, la presión sobre los recursos naturales y la necesidad de garantizar equidad espacial en la distribución de equipamientos públicos. En este contexto, los modelos matemáticos de localización se ubican como herramientas relevantes para apoyar la toma de decisiones en proyectos de infraestructura urbana, al permitir una asignación racional, eficiente y técnicamente justificada de recursos en el territorio.

La localización de dispensadores públicos de agua potable no puede depender únicamente de criterios intuitivos o decisiones políticas. Por el contrario, requiere una aproximación metodológica que articule variables técnicas, sociales, ambientales y económicas, y que permita simular escenarios, optimizar coberturas y reducir desigualdades territoriales. Como observa Velásquez-Bermúdez (2019), la

aplicación de modelos matemáticos a la planificación urbana podría permitir aumentar el excedente social, o el 'beneficio neto' que la sociedad obtiene cuando accede a servicios públicos bajo parámetros justos y apropiados de eficiencia y sostenibilidad.

Los modelos de localización en entornos urbanos se usan en distintos campos que van desde la logística, la salud pública, la educación y la gestión ambiental, donde la aplicación de esta técnica ha cambiado la optimización clásica a sistemas híbridos combinados con análisis espacial, inteligencia artificial y modelos de participación ciudadana. Benabent Fernández de Córdoba (2014) afirma que la estrategia de planificación territorial siempre debe tener en cuenta una combinación de procesos de toma de decisiones estrictos que estén alineados a la teoría urbana relacionada con el método de trabajo y respondan a las sociedades con soluciones técnicas socialmente relevantes y políticamente verdaderas.

Para el municipio de Zarzal, al instalar dispensadores públicos de agua potable, el método debe responder tres preguntas esenciales como: cuántos dispensadores se requieren, en qué áreas deben instalarse y qué puntos de intervención se deben priorizar. En este orden de ideas, se emplean modelos matemáticos de localización para este propósito, para responder a estas preguntas de manera sistemática y transparente. La literatura especializada señala muchas familias de modelos que corresponden principalmente a este tipo de problema. Entre ellos destacan:

- Los **modelos de cobertura máxima**, que buscan garantizar que la mayor cantidad de población esté dentro de un radio de servicio definido, optimizando el número de unidades necesarias.
- Los **modelos de P-mediana**, que minimizan la distancia promedio entre la población y los puntos de servicio, promoviendo equidad territorial.
- Los **modelos de asignación óptima**, que distribuyen recursos en función de criterios de beneficio social, vulnerabilidad, costos operativos y eficiencia técnica.
- El modelo de **codo de Jambú** es un método matemático que ayuda a definir el número óptimo de agrupaciones (clusters) al aplicar K-means, identificando el punto donde agregar más grupos deja de mejorar significativamente el modelo

Estos modelos no solo permiten determinar la cantidad de dispensadores a instalar, sino también seleccionar los sectores más adecuados para su ubicación, considerando variables como densidad poblacional, accesibilidad vial, presencia de equipamientos urbanos, calidad del agua, presión hidráulica, y aceptación comunitaria. Como lo plantea Ramírez (2023), la justicia territorial en la localización de equipamientos colectivos solo puede alcanzarse mediante el uso de modelos que integren datos objetivos, criterios validados y herramientas de optimización espacial.

Además, la integración de estos modelos con herramientas multicriterio como AHP difuso, TOPSIS y BOCR —ya seleccionadas en este proyecto— permite construir

una propuesta metodológica robusta, esta articula la evaluación técnica con la dimensión estratégica y social de la intervención. Esta sinergia metodológica responde al llamado de Ortúzar Larraín (2010), quien plantea que la planificación territorial debe ser entendida como una actividad dinámica y compleja, que combina el mejoramiento del medio físico con la búsqueda del bienestar colectivo.

En consecuencia, los modelos matemáticos de localización no solo aportan precisión al proyecto, sino que también permiten respaldar las decisiones de cantidad y ubicación de dispensadores en Zarzal, garantizando que la intervención sea eficiente y sostenible. En las secciones que se evidenciarán a continuación se presentarán los modelos seleccionados, sus fundamentos teóricos y su aplicación específica en el contexto del municipio.

2.2.1 Modelo de cobertura máxima (Maximal Covering Location Problem – MCLP)

El objetivo principal del modelo de cobertura máxima es colocar un número limitado de instalaciones (dispensadores) dentro de un radio fijo para aumentar la demanda cubierta. Es decir, busca asegurar que la mayor población posible sea atendida por al menos una unidad, considerando limitaciones espaciales y operativas.

El modelo propuesto por Church y ReVelle (1974) ha sido ampliamente utilizado en entornos urbanos (estaciones de bomberos, centros de salud, puntos de distribución logística, etc.). En Zarzal, podría utilizarse para especificar el número de dispensadores necesarios para cubrir a la mayor parte de la población urbana y rural con radios de cobertura en el rango de 300 a 500 metros, ajustados por densidad de población y accesibilidad vial.

Fernández Gutiérrez (2019) propone una versión difusa del MCLP que incorpora incertidumbre en la demanda y en la capacidad de cobertura, lo cual resulta útil en territorios con variabilidad estacional en el acceso al agua, como ocurre en la cuenca del río La Paila.

“El MCLP restringe el número de instalaciones a ubicar y maximiza la demanda cubierta, permitiendo una asignación eficiente en contextos con recursos limitados” (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

2.2.2 Modelo P-mediana

El modelo P-mediana busca seleccionar “P” ubicaciones dentro de un conjunto de sitios candidatos, de manera que se minimice la distancia promedio entre los puntos de demanda (población) y las instalaciones seleccionadas. A diferencia del modelo

de cobertura máxima, que prioriza la cantidad de población atendida, el P-mediana se enfoca en la equidad espacial, reduciendo las disparidades en el acceso.

Este modelo ha sido aplicado en la localización de hospitales, estaciones de carga, centros educativos y contenedores de residuos sólidos urbanos. Jiménez (2018) lo describe en sus textos como “un modelo de optimización lineal entera que permite minimizar la suma ponderada de distancias entre los puntos de demanda y las instalaciones abiertas”.

En Zarzal, este modelo puede ser usado de forma acertada para seleccionar los sectores más equitativos para instalar dispensadores, garantizando que la distancia promedio desde los barrios y corregimientos hasta el punto de acceso sea la menor posible. Esto es especialmente importante en zonas rurales dispersas, donde la accesibilidad es un factor crítico.

“La P-mediana permite localizar instalaciones de forma que se minimicen las distancias de viaje entre estaciones y usuarios, promoviendo eficiencia y equidad” (Sánchez & Gutiérrez, 2022).

2.2.3 Modelo de asignación óptima

El modelo de asignación óptima está enfocado en distribuir recursos (en este caso, dispensadores) en función a criterios de beneficio social, vulnerabilidad, costos operativos y eficiencia técnica. Con diferencia de los modelos anteriores, que se centran en cobertura o distancia, este modelo incorpora variables socioeconómicas y estratégicas en la decisión.

Velásquez-Bermúdez (2019) propone un enfoque de asignación fundamentado en el aumento del excedente social, el cual consiste en la utilidad neta que recibe la población al acceder a un servicio en condiciones adecuadas. Este modelo ha sido usado en la revisión de planes de ordenamiento territorial en Medellín y Bogotá, y permite priorizar zonas de intervención según su impacto social y técnico.

En Zarzal, este modelo puede ser usado para definir no solo cuántos dispensadores instalar, sino también en qué orden hacerlo, priorizando sectores con mayor vulnerabilidad hídrica, menor infraestructura disponible y mayor densidad poblacional.

“La asignación óptima permite distribuir equipamientos urbanos de forma que se maximice el beneficio social, considerando restricciones técnicas, económicas y normativas” (Ramírez, 2023).

La localización de equipamientos urbanos, como los dispensadores públicos de agua potable, exige una metodología que mezcle precisión técnica, sensibilidad territorial y capacidad de adaptación a contextos complejos. En este proyecto, se consideraron tres modelos matemáticos validados anteriormente en la literatura: el modelo de cobertura máxima, el modelo P-mediana y el modelo de asignación

óptima. Cada uno corresponde a una lógica distinta de intervención, y su pertinencia depende de los objetivos especificados en el proyecto, las características del territorio y la disponibilidad de datos solicitados.

2.2.4 Modelo de cobertura máxima: eficiencia con limitaciones

El modelo de cobertura máxima (MCLP) parte de una lógica de eficiencia: este busca ubicar un número limitado de instalaciones de forma que aumente la población cubierta dentro de un radio de servicio. Es funcional en contextos donde los recursos son escasos y se requiere garantizar acceso básico al mayor número de personas. En Zarzal, este modelo permitiría identificar cuántos dispensadores se necesitan para cubrir las zonas mayormente pobladas, especialmente en la cabecera urbana.

Sin embargo, su principal limitación es que prefiere la cantidad sobre la equidad. Al centrarse en maximizar cobertura, puede dejar fuera sectores vulnerables como los corregimientos rurales del municipio, que no concentran grandes volúmenes de población, pero sí presentan alta necesidad de acceso al agua. Además, no incorpora variables sociales, económicas ni estratégicas en la decisión. Dado este tipo de problemáticas, se decidió de momento, usar únicamente el casco urbano del municipio como pilar fundamental del proyecto.

2.2.5 Modelo P-mediana: equidad territorial con enfoque espacial

El modelo de mediana P introduce una lógica de equidad espacial: selecciona ubicaciones que minimizan la distancia promedio entre la población y los puntos de servicio. Es muy útil en territorios divididos, donde la accesibilidad suele ser un factor crítico. En Zarzal, este modelo permitiría una distribución más equilibrada de dispensadores entre barrios y distritos, reduciendo las desigualdades en el acceso.

Es importante porque la proximidad es un criterio de justicia territorial, según los principios de planificación equitativa. Sin embargo, su implementación necesita una base de datos georreferenciada precisa y no tiene en cuenta la vulnerabilidad social, los costos operativos o el impacto estratégico. Es decir, puede ser justo en términos de distancia, pero no necesariamente o técnicamente en función de la necesidad.

2.2.6 Modelo de asignación óptima: pertinencia social y estratégica

El modelo de asignación óptima es una lógica más compleja que asigna recursos basándose en factores técnicos, factores sociales, criterios económicos y variables estratégicas. Comparado con modelos anteriores, no se limita a la cobertura o la distancia, sino que también incorpora variables como la densidad de población, la vulnerabilidad al agua, la infraestructura disponible, los costos de mantenimiento y el beneficio social.

Para el contexto del municipio de Zarzal, este modelo permite priorizar sectores en términos de su potencial influencia: es posible intervenir en las necesidades de agua

potable basándose en la necesidad de entregar más agua potable, y las instalaciones de dispensadores pueden traer un mejor beneficio colectivo.

También es compatible con herramientas multicriterio como AHP difuso, TOPSIS y BOCR, para expresar la evaluación técnica con la visión estratégica del proyecto. La complejidad técnica — estructura de datos robusta, capacidad de modelado y validación experta — es el mayor desafío de este modelo. Pero este requisito previo también significa una propuesta metodológica sólida, transparente y basada en el contexto.

2.2.7 Modelo Codo de Jambú: Asignación óptima de clusters territoriales

El método del codo de Jambú (o el Método del Codo) es un método para encontrar la cantidad óptima de grupos en un conjunto de datos. Su propósito principal es en el algoritmo K-means, y para realizar la clasificación de varios datos en grupos homogéneos con muy pocas variaciones internas para cada grupo. El método se basa en resúmenes de errores cuadrados internos (Suma de Cuadrados Dentro del Clúster, WCSS) de una variedad de valores de k — k , el número de clústeres — con disminuciones en la suma que resultan en valores más bajos de WCSS.

Matemáticamente, el WCSS se define como:

$$WCSS = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} ||x - \mu_i||^2$$

Dónde:

- K es el número de clusters.
- S_i representa el conjunto de puntos en el cluster i .
- x es un punto dentro del cluster S_i .
- μ_i es el centroide del cluster i , es decir, el punto que representa el centro del cluster
- $||x - \mu_i||^2$ es la distancia del cuadrado entre el punto x y el centroide μ_i , esto permite dar una idea de lo lejos que se encuentra cada punto de su centro.

El “codo” se identifica como el punto de inflexión donde la tasa de disminución del WCSS se desacelera radicalmente, indicando que agregar más clusters ya no mejora significativamente la compactación del modelo. Este punto representa el equilibrio entre simplicidad y precisión, y se considera el número óptimo de clusters para el análisis.

El nombre "codo de Jambú" es un nombre popular que se adopta ampliamente en la literatura académica y técnica como un término informal para este método, así como en algunas plataformas educativas populares como Studocu. Metodológicamente, Daniel Rodríguez (2023) presenta el enfoque del codo como un enfoque intuitivo, es fácil de aplicar y puede prevenir tanto la subagrupación como el sobreajuste en modelos de segmentación territorial. Pero también advierte que la curva en ciertos conjuntos de datos podría ser suave y no mostrar un codo

definido, por lo que deberíamos considerar complementar nuestro análisis con otros métodos, como el coeficiente de silueta o el método de brecha estadística.

El método del codo ha sido ampliamente adoptado para la segmentación áreas urbanas, identificando patrones de consumo y agrupando unidades territoriales no registradas con fines prácticos antes de la aplicación de modelos multicriterio como AHP o BOCR. Su integración en los procesos de planificación urbana permite la elaboración de agrupaciones funcionales que reflejan la diversidad espacial, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia sólida y comprobada.

2.3 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE DISPENSADORES PÚBLICOS DE AGUA EN ZARZAL

Usando análisis de criterios, instrumentos multicriterio y modelos matemáticos de localización, se realiza una propuesta metodológica para la integración de perspectivas cuantitativas, cualitativas y espaciales para la toma de decisiones en el municipio de Zarzal. Esta propuesta responde a la necesidad de definir, con rigor técnico y relevancia territorial, cuántos dispensadores públicos de agua deben desplegarse y en qué sectores específicos para asegurar cobertura, equidad y sostenibilidad.

La metodología se basa en dos grandes fases: una fase de macrolocalización para identificar el número óptimo de dispensadores y sectores prioritarios para la intervención; y una fase de microlocalización para identificar puntos específicos dentro de cada sector utilizando herramientas multicriterio validadas.

2.3.1 Fase 1: Localización macro mediante modelo de asignación óptima y clusterización territorial

El método del codo de Jambú se utiliza en la primera fase y fue elegido debido a la naturaleza del problema para encontrar el número óptimo de clústeres territoriales según variables técnicas, sociales y estratégicas. Usando este enfoque, el municipio puede descomponerse en zonas homogéneas que les permiten distribuir dispensadores de agua potable pública basados en la densidad de población, vulnerabilidad al agua, infraestructura disponible, accesibilidad vial y beneficio social.

Este proceso se operacionaliza comenzando con una colección de ubicaciones propuestas en el diagnóstico territorial, que abarcan parques, áreas educativas, instalaciones deportivas, aceras anchas y espacios públicos que cuentan con una infraestructura urbana adecuada, para luego agruparse, a través de un proceso de clúster territorial, el cual permite la estructuración de unidades espaciales coherentes que pueden tener sus propias características demográficas, operativas y ambientales.

La clusterización se realiza usando técnicas de análisis multivariado, como lo es el algoritmo de **K-means**, complementado con el método del codo de Jambú para la definición del número adecuado de clusters. Entre las variables consideradas se incluyeron:

- Densidad poblacional por manzana o sector
- Índice de vulnerabilidad hídrica
- Accesibilidad peatonal y vial
- Presencia de equipamientos urbanos
- Calidad del agua y presión hidráulica

Este proceso permite identificar sectores prioritarios donde la instalación de dispensadores tendría mayor impacto social y técnico. Habiendo definido los clústeres utilizando el método del codo de Jambú, se desarrollan los modelos de ubicación como cobertura máxima, P-mediana y asignación óptima para determinar cuántos dispensadores deben instalarse en las respectivas áreas con el fin de favorecer a aquellas con mayor deficiencia de agua y una menor infraestructura disponible.

La geografía estratégica de los dispensadores públicos de agua debe incluir una segmentación territorial precisa para distinguir áreas geográficas similares basadas en la demanda, accesibilidad y vulnerabilidad. En esta situación, demostramos que el método del codo de Jambú, utilizado en el algoritmo K-means, es un método matemático efectivo para calcular el número óptimo de clústeres en el territorio. Esto minimiza la complejidad espacial al determinar dónde está el punto de inflexión en la curva de variabilidad intra-clúster, y el número ideal de clústeres que corresponden a patrones territoriales consistentes (Rodríguez, 2023).

El beneficio de este método es que puede emplearse para aumentar la solidez de los datos y prevenir la sobre-segmentación, lo cual es especialmente ventajoso en municipios con alta heterogeneidad urbana y con áreas de vecindarios no registradas, como en Zarzal. El método del codo de Jambú también será el método utilizado si se obtiene una agrupación adecuada del territorio, para permitir modelos de ubicación y toma de decisiones basados en datos confiables (Universidad Tecnológica Metropolitana de Aguascalientes, 2023). Además, la metodología funciona de manera intuitiva y tiene el potencial de ser replicada e integrada con otras herramientas de análisis espacial como GIS para una fácil incorporación basada en su aplicación en estudios de planificación urbana.

Su aplicación previa a modelos multicriterio, como AHP o BOCR, añade una evidencia más sólida a la estructura de toma de decisiones jerárquica, ya que garantiza que los criterios se evalúan en relación con unidades territoriales coherentes y comparables.

2.3.2 Fase 2: Evaluación de criterios seleccionados por expertos mediante herramientas multicriterio (AHP difuso + BOCR)

La segunda etapa consiste en la selección de los puntos específicos para la instalación dentro de cada sector priorizado. Para realizar esto, se usa una combinación de herramientas multicriterio (MCDM), estas permiten realizar una evaluación de alternativas de forma estructurada y participativa, integrando tanto el juicio experto como el análisis estratégico.

- **AHP difuso** se utiliza para la ponderación los criterios de ubicación que los expertos confirmaron previamente, por lo que también se consideró la incertidumbre y la subjetividad presentes en el juicio humano. Esta variante del método del Proceso de Jerarquía Analítica permite una representación mucho más precisa de la ambigüedad en las preferencias, haciendo uso de números difusos para capturar rangos de valoración en vez de valores únicos. Y que así, los pesos asignados reflejen de manera más realista la percepción técnica y social de los actores involucrados, fortaleciendo la legitimidad del modelo.
- **BOCR** Está integrado para ayudar a la evaluación de los pros y contras, posibilidades, costos y factores de riesgo para cada elección de sitio. Este modelo permite la evaluación de alternativas desde una perspectiva integral, involucrando no solo la viabilidad práctica, sino también los impactos sociales, el potencial para la apropiación comunitaria, los requisitos operativos y los posibles impactos ambientales o de salud. La matriz BOCR es útil para la toma de decisiones cuando los factores no son homogéneos o comparables en una situación compleja.

La combinación de herramientas puede permitir realizar una micro-localización mucho más precisa, la cual es respaldada por los criterios previamente validados, segmentación territorial y evaluación estratégica. Los resultados de esta etapa serán usados en el capítulo 3 para la definición del diseño final de la intervención, incluyendo ubicación exacta, características técnicas de los dispensadores y fases de implementación.

Integración metodológica:

La propuesta metodológica se resume de la siguiente manera:

1. **Identificación de sitios potenciales** mediante el uso del diagnóstico territorial
2. **Clusterización de sectores** según variables demográficas, hídricas y espaciales
3. **Aplicación del modelo codo de Jambú** para definir cantidad y distribución de dispensadores
4. **Revisión de criterios con AHP difuso**
5. **Análisis estratégico con BOCR**

6. Análisis final de los puntos de instalación de los dispensadores (micro localización)

Este enfoque permite garantizar que la localización de dispensadores de agua en Zarzal sea una intervención rigurosa, pertinente y territorialmente justa, alineada con los principios de la planificación urbana sostenible.

2.3.3 Fase 3: Conclusiones del proceso metodológico

La situación metodológica que se discute en este capítulo ha sido el principal apoyo para un buen enfoque en la ubicación de dispensadores de agua públicos en el Municipio de Zarzal. Los criterios de ubicación se desarrollaron tras una extensa revisión de la literatura científica, técnica y normativa para determinar la situación geográfica, social y operativa del municipio. Estos criterios se organizaron por temas para ponderarlos utilizando herramientas de análisis multicriterio y se vincularon con tecnologías de modelado matemático que pueden capturar decisiones cualitativas y transformarlas en respuestas numéricas.

Se seleccionaron las herramientas AHP difuso y BOCR por combinar las características del juicio experto, la evaluación estructurada de alternativas y la dimensión estratégica al abordar cuestiones estratégicas en un proceso de toma de decisiones. La articulación con el modelo de asignación adecuada ha proporcionado una base para construir un proyecto metodológico sólido que no solo se centre en la eficiencia técnica, sino también en la equidad territorial y la relevancia social. El uso de métodos de agrupamiento territorial también facilitó la segmentación del municipio en zonas homogéneas y la priorización de sectores prioritarios y la adaptación de la intervención a las condiciones locales.

Esta situación metodológica garantiza que la colocación de dispensadores no sea simplemente un acto fragmentario, sino más bien una estrategia integrada y coherente para el control de territorios que está bien fundamentada y es replicable.

En consecuencia, el trabajo realizado en este capítulo ha logrado los siguientes objetivos:

- Identificar y validar criterios de localización pertinentes para el contexto de Zarzal.
- Seleccionar herramientas multicriterio que permiten evaluar alternativas con rigor técnico y sensibilidad estratégica.
- Determinar que el modelo de asignación óptima es el más adecuado para definir la cantidad y distribución de dispensadores.
- Construir una propuesta metodológica integral, que articula análisis territorial, modelamiento matemático y evaluación multicriterio.

Estas conclusiones constituyen el insumo fundamental para el desarrollo del capítulo 3, donde se aplicará la metodología propuesta para realizar la micro

localización de los dispensadores, definir su ubicación exacta y establecer las fases de implementación del proyecto.

2.4 Selección de criterios priorizados mediante validación experta: resultados de seis especialistas en planificación territorial

Se aplicó un proceso de validación experta a la propuesta de microlocalización de dispensadores públicos de agua potable para verificar la relevancia técnica, social y estratégica de los criterios empleados en la propuesta. Este proceso nos permitió descubrir qué factores podrían considerarse más relevantes para la toma de decisiones. Se basó en una encuesta estructurada (ver Anexo 1) dirigida a seis profesionales con experiencia y conocimientos en planificación urbana, gestión de infraestructuras y análisis multicriterio, provenientes de los sectores público, privado y académico. Debido a la diversidad institucional y disciplinaria de los participantes, se aseguró una visión integral del problema, incorporando enfoques operativos, regulatorios, sociales y ambientales.

Los expertos que evaluarían la encuesta ayudarían a la selección adecuada de los criterios fueron buscados cuidadosamente. Estos expertos debían cumplir con características específicas de conocimientos y experiencias, siendo clave que trabajaran en el sector hídrico, específicamente en la empresa Acuavalle, que es quien brinda el servicio en el municipio, se tuvo en cuenta el hecho de que, es indispensable que el sector público, en este caso, la Alcaldía Municipal, tuvieran una amplia participación, ya que, la experiencia en proyectos municipales era mas que necesaria a la hora de la selección de un experto. Por último, se pensó en el área académica, expertos con experiencia en este tipo de procesos e investigaciones que sirvieran de referencia y ejemplo, que conocieran los métodos seleccionados, para ayudar a la decisión sobre la selección de criterios.

Se optó por mantener el anonimato de los participantes seleccionados para evitar sesgos asociados con la identificación personal. El análisis correspondiente permitió identificar y elegir a 6 expertos, dos de ellos vinculados al área académica, en universidades destacadas del país, dos pertenecientes al área pública, trabajadores de la Alcaldía Municipal y participantes constantes en proyectos de esta índole y por último, dos trabajadores del área privada, específicamente de la empresa Acuavalle, conecedora de la infraestructura hídrica del municipio.

La encuesta fue diseñada bajo el enfoque BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos), permitiendo a los expertos realizar comparaciones pareadas entre criterios dentro de cada macrocategoría. A partir de sus respuestas, se calcularon las frecuencias de selección y se aplicó un proceso de normalización proporcional para determinar el nivel de importancia relativa de cada criterio. Este procedimiento permitió la identificación de los ocho criterios más relevantes, dos para cada dimensión del BOCR, que se utilizarán en la fase de evaluación multicriterio. De esta forma, la selección está estructurada por el juicio de expertos, asegurando que los criterios reflejen no solo la viabilidad técnica del proyecto, sino

que también su impacto social, su oportunidad estratégica y los riesgos asociados con su implementación.

Estos criterios prioritarios sirven como base metodológica para el desarrollo del modelo de decisión al considerar las condiciones reales del territorio y la población al construir una propuesta. Esta validación experta no solo respalda el proceso, sino que permite avances hacia una planificación urbana basada en evidencia.

Como efecto del proceso de validación experta descrito anteriormente, se construyó una matriz de frecuencias basada en las respuestas obtenidas en la encuesta aplicada a seis profesionales provenientes de los sectores público, privado y académico (ver [Anexo 1](#)). La encuesta adoptó el método BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos) el cual permitió a los expertos aplicar comparaciones por pares de criterios dentro de cada macro-categoría para determinar los factores identificados como más relevantes para la microlocalización de dispensadores de agua potable pública en el municipio de Zarzal.

La diversidad entre los participantes basada en la institución y el campo profesional proporcionó al análisis una visión más completa del proceso el cual comprende aspectos técnicos, sociales, regulatorios y operativos. Se utilizó una normalización proporcional, es decir, de acuerdo con la frecuencia de selecciones entre cada criterio, para calcular la proporción de la importancia de cada criterio. Tal proceso permitió que el juicio de los expertos fuera transparente y representativo en la ponderación, y posibilitó la selección de los ocho criterios principales, agrupados en pares para cada dimensión BOCR:

- **Beneficios:**

- *Aceptación comunitaria:* Este criterio se refiere al nivel de respaldo, apropiación y disposición de la comunidad frente a la instalación de dispensadores públicos de agua potable. Su importancia se debe a que la sostenibilidad a largo plazo de cualquier infraestructura urbana depende de su uso significativo, mantenimiento colaborativo y legitimidad social. Un alto nivel de aceptación por parte de la comunidad disminuye la probabilidad de vandalismo, facilita los procesos de educación ambiental y promueve el sentido de pertenencia de los usuarios hacia el equipamiento. Además, al proporcionar las áreas específicas donde se manifiesta la demanda social, el criterio refuerza aún más la relevancia de la intervención, mejorando así la eficiencia en la asignación de recursos. En contextos de vulnerabilidad hídrica, tal participación activa de la comunidad puede incluso funcionar como un agente de resiliencia territorial.
- *Calidad de agua disponible:* Este criterio sirve para evaluar la naturaleza físico-química y microbiológica del agua para el dispensador. Su cobertura es necesaria para garantizar que el agua suministrada sea limpia y sanitaria de acuerdo con las regulaciones nacionales e internacionales (como la Resolución 2115 de 2007 en Colombia). La calidad del agua tiene un impacto directo en la salud

pública, especialmente en áreas con niños, ancianos o donde hay acceso limitado a servicios de salud. Además, este criterio permite la priorización de sitios que tienen funcionalidad de red de suministro existente, reduciendo la necesidad de tratamientos adicionales y manteniendo la eficiencia operativa del sistema.

- **Oportunidades:**

- *Cercanía a zonas de alta afluencia:* Este criterio considera la proximidad del sitio propuesto a espacios con alta circulación peatonal, como parques, centros educativos, estaciones de transporte, zonas comerciales o espacios deportivos. Su importancia estratégica consiste en aumentar el impacto de la fuente asegurando su accesibilidad a un mayor número de personas en su vida diaria. Además, puede facilitar la integración del equipo en situaciones urbanas actuales; aumentando así su visibilidad, uso frecuente y conexión con otros servicios públicos. En cuanto a la planificación, este criterio también ayuda a localizar nodos urbanos que pueden actuar como puntos de referencia para futuras intervenciones.
- *Compatibilidad con el uso del suelo:* Este criterio evalúa si el sitio de la instalación propuesta del dispensador cumple con las condiciones del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y otras normativas urbanas vigentes. La compatibilidad de funciones y normativas es esencial para evitar conflictos legales, asegurar la seguridad jurídica del proyecto e integrarlo en el entorno urbano. Este criterio también facilita la identificación de espacios públicos que ya tienen una vocación de servicio, lo que facilita la implementación técnica y reduce los tiempos de gestión institucional. En áreas con uso de suelo residencial, educativo o recreativo, la compatibilidad también puede mejorar la apropiación comunitaria y el valor simbólico del dispensador.

- **Costos:**

- *Presión hidráulica en la red:* Este criterio técnico es principalmente una medida para una red de suministro de agua que debe proporcionar suficiente presión para asegurar el funcionamiento continuo de la fuente de agua potable. Una presión deficiente podría llevar a fallos operativos, interrupciones del servicio o la necesidad de sistemas complementarios como bombas o tanques elevados. La evaluación de este criterio nos permite elegir sitios donde la infraestructura actual proporciona un suministro constante, lo que nos permite mitigar los costos de instalación y mantenimiento. Además, en regiones con topografía irregular y redes antiguas, este criterio se convierte en un factor crítico para la viabilidad técnica del proyecto.
- *Infraestructura complementaria requerida:* Este criterio toma en cuenta trabajos adicionales necesarios para asegurar el funcionamiento del dispensador, tales como conexiones hidráulicas, ajustes eléctricos, protección física, señalización o accesibilidad universal a los dispositivos. Esto significa que uno puede evaluar el costo de una alternativa de ubicación dada, una forma de comparar

todas las alternativas de hecho y facilitar la selección racional. Si la infraestructura urbana es limitada en esas áreas, este estándar también puede aprovecharse para identificar obstáculos técnicos para la implementación o sobrecostos. Además, incluir esta dimensión durante la planificación mejora la sostenibilidad financiera del proyecto y minimiza los riesgos operativos.

- **Riesgos:**

- *Impacto ecológico del dispensador:* Este criterio evalúa las posibles alteraciones al entorno natural resultantes de la instalación del dispensador, incluyendo cambios en la vegetación, la fauna urbana, el drenaje natural o los microhábitats. Su inclusión reconoce la necesidad de construir infraestructura que sea ambientalmente responsable y tenga un impacto ecológico mínimo, además de una integración armoniosa en el entorno urbano. En regiones adyacentes a cuerpos de agua, áreas verdes o corredores ecológicos, este criterio permite la identificación de restricciones ambientales y estrategias de mitigación. Además, refuerza el enfoque de sostenibilidad del proyecto, alineándolo con los principios de planificación verde y resiliencia climática.
- *Seguridad sanitaria y control de vectores:* Este criterio aborda los riesgos potenciales debido a la proliferación de vectores (incluyendo mosquitos, roedores o aves) y la contaminación del agua (uso inadecuado, estancamiento o falta de mantenimiento). Medir su efectividad es vital para asegurarse de que el dispensador no se convierta en una amenaza para la salud, especialmente en áreas con alta densidad de población o condiciones sanitarias deficientes. Además, presenta la posibilidad de rastrear las ubicaciones de aquellas áreas donde el entorno físico permite un control sanitario efectivo, por ejemplo, espacios con buena ventilación, drenaje adecuado y acceso a servicios de limpieza. Este criterio también puede integrarse con la educación ambiental y las prácticas de gestión comunitaria para mejorar el uso seguro del equipo.

La priorización de estos criterios es un recurso relevante para la construcción del modelo multicriterio, esto permite la evaluación de alternativas de ubicación bajo una lógica que integra eficiencia operativa, equidad territorial y sostenibilidad ambiental. Además, la validación por expertos aumenta la legitimidad técnica del proceso, permitiendo asegurar que las decisiones se basen en conocimientos especializados y contextualizados, además de que respondan a las condiciones reales del territorio municipal.

Este conjunto de criterios será integrado en la matriz BOCR y posteriormente vinculado con los clusters territoriales definidos mediante el método del codo de Jambú, lo que permitirá estructurar escenarios de localización ajustados a las dinámicas urbanas y a las necesidades de la población.

2.5 Fase 1: Localización macro mediante segmentación territorial con método del codo de Jambú

Ante la evidente despreocupación institucional del municipio de Zarzal frente a la planificación estratégica de equipamientos básicos como los dispensadores públicos de agua potable, se optó por aplicar el algoritmo K-Means, una técnica de clasificación no supervisada que permite agrupar puntos geográficos en k clústeres según sus características espaciales más representativas. En esta investigación, se tomo como variable principal la distancia geográfica entre los 48 barrios del municipio, con la finalidad de construir agrupaciones funcionales que ayudaran a la toma de decisiones en la etapa de localización.

Con una matriz de distancias, se consideró cada barrio y se analizaron sus relaciones con otros para encontrar aquellos barrios vecinos que se encontraban geográficamente más cerca. La segmentación territorial implica reducir la diversidad en la estructura interna de cada clúster y permitir la generalización de modelos multicriterio como el AHP difuso y BOCR, ya que los criterios pueden probarse en unidades análogas.

Aunque el algoritmo K-Means permite la agrupación de puntos, posee un gran inconveniente: no calcula el número óptimo de clústeres k y esta decisión generalmente se toma sobre la base de estándares elegidos arbitrariamente que pueden afectar la calidad del análisis del modelo. Para abordar esta limitación, se integró el método del codo de Jambú, que es una técnica utilizada para determinar el valor óptimo de k a través del análisis de la varianza intra-clúster. Se basa específicamente en la idea de que al aumentar el número de clústeres, la distancia promedio de los puntos al centroide disminuirá hasta que exista un punto de inflexión en el que esta mejora se estabilice.

En este proyecto, se utilizó el lenguaje de programación Python para desarrollar el código que implementa tanto el algoritmo K-Means como el método del codo de Jambú. Las gráficas resultantes (ver Gráficas 4 y 5) muestran el comportamiento de la varianza intra-cluster y permiten visualizar el punto óptimo de segmentación territorial.

Para determinar la cantidad óptima de clústeres k , se utilizó una matriz de distancias geográficas entre los 48 barrios, construida a partir de la conversión de coordenadas geodésicas a coordenadas cartesianas mediante la herramienta “Calculadora Geodésica UTMV9.200712”. Esta matriz fue incorporada al código en Python mediante la variable denominada distancias, asignando la ruta del archivo correspondiente para su procesamiento.

```

1 de sklearn.clúster importar KMeans
2 desde sklearn importar métricas
3 de scipy .space .distance importar cdist
4 importar pandas como importar pd
5 importar numpy como entrada
6 importar matplotlib.pyplot como plt
7
8 % matplotlib en línea
9
10
11 #definir los datos a utilizar
12
13 distancias = pd . read_csv ( "C:/Users/efra/Escritorio/Univalle/matriz_dist.csv" , sep = ";" , index_col = False , motor = "python" )

```

Ilustración 3. Ruta de matriz de distancias. Fuente: Elaboración propia

En el marco de esta investigación, se procede con la identificación del número óptimo de agrupaciones territoriales que permitan segmentar los 48 barrios del municipio de Zarzal en zonas homogéneas para la instalación estratégica de dispensadores públicos de agua potable. Para ello, se aplica el método del codo de Jambú, el cual evalúa la distancia media de cada punto a su centroide, enfocándose en las distancias intra-cluster como indicador de compacidad.

La lógica del agrupamiento se basa en la proximidad espacial: los barrios que presentan menor distancia entre sí tienden a conformar un mismo clúster. Esta distancia se mide a través de la suma de los cuadrados dentro de cada grupo, conocida como *Within-Cluster Sum of Squares* (WCSS, por sus siglas en inglés). Al graficar los valores de WCSS frente al número de clústeres k, se identifica un punto de inflexión —el “codo”— que representa el equilibrio entre precisión y simplicidad, y permite seleccionar el número óptimo de agrupaciones para el análisis territorial.

```

WCSS = ( )

para i en el rango ( 1 , 31 )
    kmeans_distan = Kmeans ( n_clusters = i , max_iter = 2000 )
    kmeans_distan . fit ( distancias_normal ) #Se aplica KMeans a la base de datos
    wcss .append ( kmeans_distan .inertia_ )
    plt . plot ( rango ( 1 , 31 ) , wcss )
    pl . título ( "CODO DE JAMBÚ" )
    pl . xlabel ( "NÚMERO DE CLUSTERS" )
    pl . ylabel ( "WCSS SUMA DE LOS CUADRADOS DE LAS DISTANCIAS" ) #WCSS corresponde a un indicador de similitud
    plt . mostrar ( )

```

Ilustración 4. Aplicación del Método de Codo De Jambú. Fuente: Elaboración Propia

El análisis realizado mediante el método del codo de Jambú permitió identificar que el número óptimo de clústeres para esta investigación es **3**, valor que representa el punto de inflexión en la curva de variabilidad intra-cluster y que garantiza una segmentación territorial coherente con las dinámicas urbanas del municipio de Zarzal. Este resultado establece que $k = 3$ es el número ideal de agrupaciones para avanzar con la micro-localización de dispensadores públicos de agua potable.

El algoritmo K-Means se aplicó desde este valor con $k = 3$, que se utilizó para consolidar los 48 barrios en zonas iguales. Como parte de los procedimientos de desarrollo de código, se creó una lista llamada PointNames, que contiene las etiquetas correspondientes a cada barrios, y se estructuró la asignación de cada punto a su respectivo clúster. Esta segmentación territorial servirá como punto de

partida en los modelos multicriterio AHP difuso y BOCR, ofreciendo un análisis preciso y específico del contexto de las alternativas de sitio.

```
wcss = ( )

para i en el rango ( 1 , 31 )
    kmeans_distan = KMeans ( n_clusters = i , max_iter = 2000 )
    kmeans_distan . fit ( distancias_normal ) #Se aplica KMeans a la base de datos
    wcss . append ( kmeans_distan . inertia_ )
    plt . plot ( rango ( 1 , 31 ) , wcss )
    pl . título ( "CODIGO DE JAMBÚ" )
    pl . xlabel ( "NÚMERO DE CLUSTERS" )
    pl . ylabel ( "WCSS SUMA DE LOS CUADRADOS DE LAS DISTANCIAS" ) #WCSS corresponde a un indicador de similitud
    plt . mostrar )

#Aplicación del método K-MEANS
distancias_clusters = KMeans ( n_clusters = 3 , max_iter = 2000 ) #se crea el modelo
distancias_clusters . fit ( distancias_normal ) #Se aplica el modelo
distancias [ "KMeans_Clusters" ] = distancias_clusters . etiquetas_
de sklearn . descomposición importar aplica
pca = pca ( n_componentes = 2 )
pca_distancias = pca . fit_transform ( distancias_normales )
pca_distancias_df = pd . DataFrame ( datos = pca_distancias , columnas = ( "componente_1" , "componente_2" ))
pca_nombres_distancias = pd . concat ( ( pca_distancias_df , distancias ( ( "KMeans_Clusters" ) ) ) , eje = 1 )
pca_nombres_distancias
```

Ilustración 5. Aplicación método K-Means. Fuente: Elaboración Propia

Se presentan los resultados obtenidos después la ejecución del algoritmo K-Means, aplicado con un valor de $k = 3$, que corresponde a la segmentación territorial en tres clústeres. El modelo agrupa los 48 barrios del municipio de Zarzal según su proximidad geográfica, permitiendo identificar relaciones espaciales importantes para la implementación estratégica de fuentes de agua.

En cada uno de estos puntos fue asignado a un clúster específico, donde se le otorgó un índice que permite vincularlo directamente con el barrio correspondiente. Esta clasificación facilita el análisis posterior con los modelos multicriterio AHP difuso y BOCR. Ver Gráfico

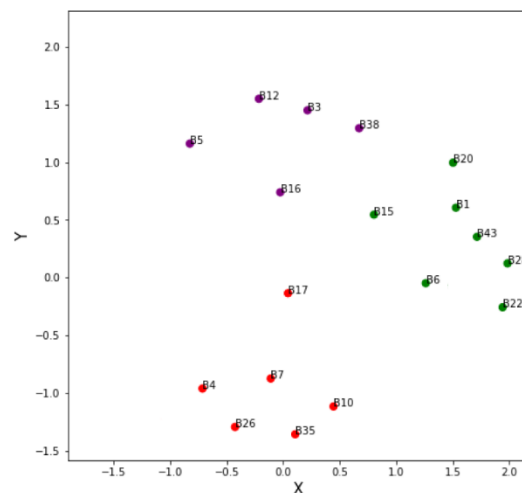


Ilustración 6. Clusteración de datos. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9. Clúster y coordenadas cartesianas. Fuente: Elaboración Propia

No.	ID BARRIO	BARRIO	Coordenadas Cartesianas		DISTANCIA TOTAL (mt)
			X	Y	
CLÚSTER 1					
1	B1	Alto Buenos Aires	381604,3125	485436,699	2712,88
2	B6	Gonzalo Echeverry	381493,812	485768,5199	2787,96
3	B15	Quindío	381271,5483	485547,7233	3892,33
4	B20	Urbanización Brisas de Riopaila	381603,9973	485215,5772	4016,95
5	B22	Urbanización Ciudad del Pacifico	381937,8636	48587,4439	3716,01
6	B28	Urbanización Discapacitados	381937,549	48565,3304	3153,43
7	B43	Urbanización Puertas del Sol II	381715,4441	485547,0896	2379,12
CLÚISTER 2					
8	B3	Colombina	380938,1506	485216,5289	1271,49
9	B5	El Placer	380494,5702	485438,2808	1968,27
10	B12	Los Lagos Etapa I	380716,2014	485216,8474	1378,23
11	B16	San Rafael	380938,6261	485548,2001	1587,3
12	B38	Urbanización Lina María	381160,0996	485216,2111	1766,53
CLÚSTER 3					
13	B4	El Guamal	380828,7639	486322,2592	1833,71
14	B7	La Balvanera	381050,5514	486211,3833	1527,08
15	B10	Las Mercedes	381272,6561	486321,6221	1833,71
16	B17	Centro	380150,0757	485879,7122	2666,39
17	B26	Urbanización de Zarzalito	380940,0548	486543,2139	1891,31
18	B35	Urbanización La Castilla	381162,0000	486542,8952	1891,31

Con base en el análisis territorial realizado mediante el algoritmo K-Means y la aplicación del método del codo de Jambú, se consolidó una segmentación espacial del municipio de Zarzal en tres clústeres que representan zonas urbanas con características homogéneas en términos de proximidad geográfica, densidad poblacional y dinámica urbana. Este grupo responde a criterios técnicos de solidez y diferenciación espacial, donde se alinea con una visión estratégica de intervención que reconoce las características del territorio y las necesidades de la población.

Cada uno de los clúster identificado representa una unidad territorial relevante para la ubicación de dispensadores públicos de agua potable, facilitando así que esta intervención se enfoque en áreas con condiciones similares de accesibilidad, infraestructura y presión hidráulica.

La decisión de asignar cada uno de los tres clústeres al sitio no es meramente algorítmica o procedimental, sino que se tomó a través de una lectura profunda del territorio donde la geografía del barrio, su proximidad relativa, combinada con sus

dinámicas urbanas, proporcionan condiciones positivas para asegurar un campo de juego equitativo en el acceso al agua potable. Cada clúster es un punto de oportunidad para mejorar la cobertura, el acceso y la apropiación comunitaria del equipo.

Además, este diseño territorial apoya el desarrollo de enfoques de implementación por fases que serían sensibles a las capacidades técnicas y presupuestarias locales, así como a la coordinación interinstitucional requerida para garantizar la sostenibilidad de dicho sistema.

De esta manera, los tres clústeres delinean no solo el espacio físico, sino que también determinan las modalidades operativas de la propuesta y guían la intervención hacia una forma de planificación urbana justa, eficiente y resiliente. Los clústeres están agregados y se consideran las ubicaciones mejor posicionadas para instalar los dispensadores públicos de agua potable en Zarzal como las etapas iniciales para el diseño final de la intervención.

2.6 Fase 2: Evaluación de criterios seleccionados por expertos mediante herramientas multicriterio (AHP difuso + BOCR)

La segunda etapa del proyecto se concentra en el estudio sistemático de los aspectos técnicos, sociales y ambientales que afectan la microlocalización de los dispensadores públicos de agua potable en el municipio de Zarzal. Para lograr esto, se adoptan dos poderosas herramientas multicriterio con un fuerte rigor metodológico, siendo el AHP difuso (Proceso de Jerarquía Analítica en lógica difusa) y el modelo BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos), para caracterizar la complejidad del problema de toma de decisiones y representar de manera precisa las consideraciones tomadas por los expertos involucrados.

Usando el AHP difuso, el problema se descompone en niveles jerárquicos y se compara en base a criterios en situaciones ambiguas y la naturaleza de las decisiones humanas se representa mediante números difusos. La herramienta proporciona un método para obtener pesos relativos para cada criterio, como porcentajes que muestran su importancia en los procesos de toma de decisiones.

Además, se realizó una clasificación de los criterios mediante el modelo BOCR, con la finalidad de identificar la conveniencia integral de la propuesta en el contexto municipal. Esta clasificación permitió agrupar los criterios según su impacto en la implementación del sistema de dispensadores, diferenciando aquellos que representan beneficios tangibles, oportunidades de mejora, costos operativos o riesgos potenciales.

La combinación de ambas metodologías responde a la necesidad de contar con un enfoque sustentado, capaz de relacionar la percepción experta con la lógica matemática, y de traducir los juicios cualitativos en resultados cuantificables que orienten la toma de decisiones.

Dichos resultados permiten identificar no solo los criterios que fueron considerados más importantes, sino que también el porcentaje de selección que cada uno recibió, lo que evidencia el consenso técnico y social en torno a las variables críticas del proyecto. Esta ponderación experta constituye la base para la priorización de alternativas en la fase siguiente, garantizando que las decisiones estén respaldadas en una lectura contextualizada.

Como parte de la metodología, se establecieron cuatro macro-criterios —Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos (BOCR)— que establecen la evaluación de la propuesta de instalación de dispensadores públicos de agua potable en Zarzal.

Tabla 10. Peso relativo de Macro - Criterios. Fuente: Elaboración Propia

Macro-Criterio	Descripción general	Peso relativo aproximado
Beneficios	Aceptación comunitaria, cobertura, calidad	0,40
Oportunidades	Afluencia urbana, compatibilidad territorial	0,25
Costos	Mantenimiento, presión hidráulica, espacio	0.20
Riesgos	Impacto ecológico, vulnerabilidad, seguridad	0,15

Estos valores fueron obtenidos mediante un proceso de defuzzificación de los resultados de los expertos, esta técnica permitió transformar las valoraciones cualitativas expresadas en lenguaje natural como “muy importante”, “moderadamente relevante” o “poco significativo” en valores numéricos precisos, utilizando lógica difusa.

Una vez defuzzificados, los valores, estos fueron sometidos a un proceso de normalización el cual garantiza la comparabilidad entre criterios y permite que la suma total de los pesos sea igual a uno. Esta etapa asegura que cada criterio tenga una representación proporcional dentro del modelo, sin que su influencia se vea distorsionada por escalas distintas o por la cantidad de elementos evaluados.

Como resultado final se refleja una claridad estratégica que se da a cada dimensión en el contexto específico del municipio de Zarzal. En otras palabras, los pesos obtenidos no solo indican qué criterios son más relevantes desde una perspectiva técnica, sino que también revelan cómo los expertos interpretan las necesidades, oportunidades y limitaciones del territorio. Esta ponderación se convierte así en un recurso relevante para la orientación de la toma de decisiones, al permitir que las alternativas de localización se evalúen con base en criterios que han sido validados y jerarquizados por quienes conocen de cerca la realidad municipal.

Se presentan los ocho criterios seleccionados por los expertos, organizados según los macro-criterios BOCR, presentando sus porcentajes de preferencia mediante el

modelo AHP difuso. Para efectos prácticos, a cada criterio se le adiciono una nomenclatura que lo identifica en el orden de la tabla, siendo C1 el primer criterio visto en la tabla y C8 el ultimo. Los porcentajes reflejan el nivel de importancia asignado a cada criterio dentro del proceso de decisión para la micro-localización de dispensadores públicos de agua potable en Zarzal.

Tabla 11. Peso de Criterios. Fuente: Elaboración Propia

N°	Criterio evaluado	Macro-Criterio	Peso (%)
C1	Aceptación comunitaria	Beneficios	17,6%
C2	Calidad de agua disponible	Beneficios	22,4%
C3	Cercanía a zonas de alta afluencia	Oportunidades	20,0%
C4	Compatibilidad con el uso de suelo	Oportunidades	15,3%
C5	Presión hidráulica disponible	Costos	9,7%
C6	Infraestructura complementaria requerida	Costos	6,2%
C7	Impacto ecológico del dispensador	Riesgos	5,1%
C8	Seguridad sanitaria	Riesgos	3,7%

La distribución de pesos obtenida mediante el modelo AHP difuso revela una clara tendencia en la priorización de criterios por parte de los expertos, lo que permite interpretar no solo la relevancia técnica de cada variable, sino también la visión territorial y social que subyace en la propuesta. En conjunto, los criterios agrupados bajo el macro-criterio Beneficios concentran más del 60% del peso total, lo que evidencia una orientación decidida hacia el impacto directo que tendrá la instalación de los dispensadores públicos de agua potable sobre la comunidad.

El criterio Calidad de agua (C2), con un peso del 22.4%, fue el más valorado por los expertos, lo que indica que la capacidad de atender a un mayor número de habitantes es vista como el principal indicador de efectividad y equidad. Les siguen Cercanía a zonas de alta afluencia (C3) con 20.0% y Aceptación comunitaria (C1) con 17.6%, lo que refuerza la idea de que la propuesta debe ser no solo técnicamente viable, sino también socialmente apropiada y ambientalmente segura.

En el macro-criterio Oportunidades, el criterio Compatibilidad con el uso de suelo (C4) obtuvo un peso significativo del 15.3%, lo que sugiere que la ubicación estratégica en puntos de tránsito frecuente es clave para garantizar el uso efectivo

del equipamiento. En contraste, Presión hidráulica disponible (C5) recibió un 9.7%, lo que indica que, si bien la integración del dispensador en el entorno municipal es importante, no significa que sea una barrera crítica que afecte la funcionalidad del sistema.

Los criterios agrupados bajo Costos y Riesgos recibieron menor porcentaje de preferencia, con valores entre 3.7% y 6.2%, lo que puede analizarse como una señal confiable en la capacidad técnica del municipio para asumir los desafíos operativos y contrarrestar los impactos negativos. Por ejemplo, Infraestructura complementaria requerida (C6) e Impacto ecológico del dispensador (C7) fueron considerados importantes, pero no determinantes, mientras que el Seguridad sanitaria (C8) fue el menos valorado, lo que podría reflejar una percepción de bajo riesgo en las zonas priorizadas.

Esta distribución de preferencias permite construir una matriz de decisión respaldada, donde los criterios más destacados definen la selección de sitios dentro de los tres clústeres definidos previamente. Además, la lectura estratégica de estos resultados refuerza la finalidad participativa del proyecto, al demostrar que las decisiones están fundamentadas en opiniones expertas contextualizadas, y no en supuestos.

Además, la evaluación AHP difuso no solo jerarquiza los criterios, sino que también muestra las prioridades reales del municipio, esto permite que la propuesta de micro-localización se construya sobre una base metodológica sólida, sensible al entorno y alineada con los objetivos de equidad, eficiencia y sostenibilidad que guían la intervención en Zarzal.

De acuerdo a la segmentación que fue obtenida usando el algoritmo K-Means ($k = 3$) y en la evaluación experta de criterios mediante el modelo AHP difuso, se establecieron diferentes puntos estratégicos distribuidos en tres clústeres, que representan zonas urbanas con características similares y de diversas necesidades.

Mediante el análisis se pudo identificar un total de 18 barrios catalogados como posibles ubicaciones para la instalación de dispensadores públicos de agua potable, distribuidos de la siguiente manera:

- **Clúster 1:** 7 barrios seleccionados
- **Clúster 2:** 5 barrios seleccionados
- **Clúster 3:** 6 barrios seleccionados

Esta distribución no fue tomada al azar: cada grupo fue conformado teniendo en cuenta los pesos relativos de los criterios evaluados como cobertura poblacional, calidad del agua, aceptación comunitaria y cercanía a zonas de alta afluencia y la lectura de las condiciones urbanas actuales. Los barrios seleccionados incluidos en cada clúster muestran condiciones ideales de accesibilidad, infraestructura básica y presión hidráulica.

La propuesta de estos 18 sitios estratégicos permite abordar las necesidades del municipio de Zarzal, atendiendo tanto a sectores con alta densidad poblacional como a zonas históricamente marginadas en términos de acceso a servicios públicos. Este resultado constituye una base sólida para la implementación del sistema, facilitando la planificación operativa, la asignación eficiente de recursos y la articulación interinstitucional.

Así mismo, la selección final no solo responde a criterios técnicos, sino que también a una decisión estratégica, construida sobre confirmación, participación experta y sensibilidad urbana. Estos 18 barrios representan nodos de oportunidad para avanzar hacia una planificación más equitativa, resiliente y centrada en el derecho al agua como bien público esencial.

2.7 Fase 3: Conclusiones del proceso metodológico

Para finalizar se lleva a cabo un análisis profundo del proceso de desarrollo metodológico con el objetivo de integrar puntos de aprendizaje/validación y conclusiones obtenidas en fases anteriores.

La fusión de una lectura espacial, multicriterio y contextual del territorio hizo posible el desarrollo de una planificación urbana más equitativa, eficiente y replicable. Un factor importante para el éxito de ese proceso de investigación llevado a cabo para este trabajo fue la selección estratégica de expertos; no fue una elección metodológica, que el procedimiento ha tomado en el pasado como una formalidad y la selección de expertos debe determinarse como una estructura que determinaría la calidad y profundidad de los estudios.

La formación del grupo de expertos se basó en la experiencia, la diversidad institucional y consideraciones de conocimiento situado. Se reunieron seis personas, que tenían antecedentes sólidos y complementarios: dos investigadores, con conocimiento ambiental y experiencia práctica en investigación; dos funcionarios del sector público, que tienen buena experiencia en proyectos de infraestructura de agua o procesos administrativos locales; dos personas del sector privado, con contactos relevantes de la empresa Acuavalle y con una visión técnica y operativa desde la perspectiva de la prestación de servicios.

Esta diversidad no solo sirvió para mejorar la validación de criterios, además de asegurar que las decisiones que llevarían a un enfoque de estandarización fueran informadas por conocimiento experto, sensibilidad institucional y comprensión territorial. Mantener la confidencialidad de los participantes se basó en razones éticas y metodológicas motivadas por la necesidad de asegurar la libertad de opinión, sin el peligro de sesgar opiniones y prejuicios, e invitar a una participación honesta y crítica. Por el contrario, el anterior no solo hizo muy poco trabajo contra la transparencia, sino que mejoró la calidad de las contribuciones e hizo posible un modelo más sólido, robusto y confiable. Debido a esta selección de expertos, fue posible avanzar sólidamente en la construcción del modelo matemático,

particularmente en el uso de AHP difuso. Implica la traducción del juicio humano en un porcentaje de importancia para la incertidumbre.

La calidad recibida de las contribuciones ayudó a priorizar ocho características importantes, mejorando así la validez de los clústeres establecidos en la etapa anterior y solidificando una elección de 18 barrios estratégicos. Esta selección se realiza en base a la lógica regional de impacto poblacional, capacidad técnica y aceptación comunitaria, así como para una entrada a la planificación urbana sostenible del municipio.

La coherencia entre fases; la adecuación de los criterios seleccionados; y la capacidad de respuesta del modelo a los requisitos reales del territorio indican plena satisfacción de los tres criterios específicos que han sido introducidos por el proyecto desde el inicio, la identificación precisa de variables pertinentes, prueba experta de la validez de los criterios de selección, y la integración exitosa de los criterios en el modelo multicriterio. Cada uno de estos objetivos se cumplió con rigor, pero también con sensibilidad territorial, notando que para cada punto de datos hay una comunidad, un requisito, una oportunidad de transformación.

La propuesta final no se limitará a encontrar áreas donde los dispensadores de agua potable sean factibles. Es un abrazo a la justicia territorial, el derecho al acceso igualitario al agua como bien común y la construcción de ciudades más justas. En ciudades como Zarzal, donde la fragmentación urbana, la desigualdad en el acceso a los servicios públicos y la escasez de recursos naturales son problemas rutinarios, tener las herramientas para priorizar intervenciones de manera técnica, participativa y contextualizada es más que beneficioso: es imperativo. Además, este tipo de ejercicio construye la capacidad institucional del municipio al dar a los equipos técnicos insumos tangibles para tomar decisiones, mejor asignar recursos, así como abrir el camino en el que se producen las inversiones públicas. La metodología aplicada (segmentación territorial, evaluación de expertos y priorización de diferentes criterios) parece ser flexible, escalable y altamente relevante para abordar el problema de la planificación urbana en áreas de alta complejidad social y técnica.

El uso de análisis de varios criterios y técnicas de análisis espacial nos permite ir más allá de decisiones basadas en la intuición y aplicaciones aisladas a modelos integrados que delinear evidencia técnica específica, participación de expertos y sensibilidad comunitaria. En áreas con alta fragmentación urbana, acceso desigual a servicios sociales y degradación de recursos naturales, los estudios que se basan en criterios, son agnósticos regionalmente en su alcance y priorizan intervenciones son cruciales para avanzar hacia una gestión más equitativa, eficiente y sostenible.

Tal investigación constituye un paso importante en el desarrollo de sistemas de planificación urbana en municipios como Zarzal, cuya dinámica territorial, social y ambiental requiere una metodología robusta específica para el contexto. El uso de métodos replicables como los utilizados en este estudio también permitirá la formulación de políticas públicas basadas en evidencia que aborden las necesidades de la comunidad y aseguren el derecho al agua como bien común.

Como conclusión final, esta investigación no intenta resolver un solo caso, sino más bien remodelar la cultura de la planificación territorial, que es cómo el municipio de Zarzal pretende ser una representación para aplicar medios técnicos innovadores, participativos y sólidos en los esfuerzos de construcción de ciudades. El plan representa no solo una respuesta a una necesidad más práctica, por ejemplo, mejorar el acceso al agua potable como regla general, sino una visión de la ciudad, una ciudad cuya infraestructura debe planificarse con una visión de evidencia, participación y justicia territorial.

Este es un paso importante hacia una planificación urbana más holística y ecológica centrada en el bienestar colectivo de los residentes de Zarzal. Y solo cuando se aplica a esta combinación de técnica, territorio y comunidad, este proyecto puede ser de mayor servicio. Porque más allá de algoritmos, matrices y modelos, está la apuesta de crear ciudades más humanas, donde respondemos cada vez que tomamos una decisión a una necesidad real, una voz escuchada, una vida digna.

Este estudio ofrece no solo direcciones para localizar dispensadores de agua: recomienda formas de pensar sobre el territorio, cómo decidir con justicia, cómo planificar con compasión. Y eso, en un tiempo de crisis del agua, fragmentación social y urgencia climática, no es simplemente una hazaña técnica, es una declaración de principios.

3 TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto sirve como un primer paso en una empresa mucho más grande para mejorar la planificación urbana sostenible dentro del municipio de Zarzal. A través de los resultados obtenidos, se disponen de vías alternativas para la investigación aplicada, el desarrollo técnico y la articulación institucional, lo que permitirá escalar el impacto de esta propuesta y consolidar una cultura de toma de decisiones basada en evidencia, participativa y basada en la justicia territorial.

La implementación de un sistema de monitoreo y evaluación participativa para los dispensadores públicos instalados, que permita el seguimiento de su operación, niveles de uso, mantenimiento, percepción ciudadana y sostenibilidad operativa, es una de las principales tareas futuras. Esto incluirá indicadores técnicos (presión hidráulica, calidad del agua, frecuencia de uso) e indicadores sociales (nivel de apropiación comunitaria; satisfacción con los servicios; reportes ciudadanos); el sistema está diseñado en base a una asociación, involucrando líderes barriales, instituciones educativas y entidades municipales.

Se anticipa la replicabilidad simultánea del enfoque multicriterio en múltiples tipos de equipamiento urbano (estaciones de reciclaje, módulos de atención primaria de salud, puntos de conectividad digital o infraestructura para movilidad activa). En casos de gran complejidad territorial, la lógica BOCR y el modelo AHP difuso pueden modificarse para apoyar ciertos tipos de decisiones, donde la participación de expertos y la sensibilidad local siguen siendo partes centrales del estudio. Estos modelos harán posible la planificación a mediano y largo plazo, alineando las decisiones técnicas con las políticas públicas para asegurar el acceso equitativo a los servicios básicos.

Además, se prevé la construcción de instrumentos normativos, técnicos y pedagógicos que se conviertan en un recurso para otros municipios interesados en adoptar sistemas similares. Esto incluye manuales de ubicación, fichas técnicas de instalación, protocolos de validación comunitaria, matrices de evaluación multicriterio adaptables y modelos de gobernanza territorial. También permitirá la incorporación de esta metodología en la práctica y la extensión de la implementación por parte de gobiernos locales, organizaciones sociales y entidades de cooperación.

Finalmente, se planea el establecimiento de una plataforma digital georreferenciada basada en la integración de datos del proyecto, evaluación de criterios del proyecto, sitios seleccionados e indicadores de monitoreo para realizar la visualización dinámica del sistema y la actualización en tiempo real. La herramienta mejorará la transparencia, la participación ciudadana y la respuesta institucional, y servirá como un modelo de innovación territorial para municipios medianos en Colombia y América Latina.

En conjunto, estos trabajos futuros consolidan un campo de investigación aplicada que, además de servir a los requisitos específicos de Zarzal, sirve para reforzar la

planificación urbana sostenible y la gestión territorial participativa mientras se construyen políticas públicas basadas en evidencia. Este proyecto no se trata solo de elegir ubicaciones: crea un camino para una ciudad más equitativa y resiliente con las personas al frente.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acuavalle S.A. E.S.P. (2023). *Gestión en acción: Informe de cierre cuatrienio 2020–2023*. Gobernación del Valle del Cauca.
- Acuavalle S.A. E.S.P. (2025). *Informe técnico sobre contingencia en el sistema Sara Brut*.
- Alcaldía de Zarzal. (2024a). *Deportistas destacados del municipio de Zarzal reciben reconocimiento*.
<https://zarzalvalledelcauca.micolombiadigital.gov.co/noticias/deportistas-destacados-del-municipio-de-zarzal-reciben>
- Alcaldía de Zarzal. (2024b). *¡Orgullo de Zarzal! Juan Carlos Ruiz Colorado debuta en baloncesto nacional*.
<http://zarzalvalledelcauca.micolombiadigital.gov.co/asi-vamos-progresando/orgullo-de-zarzal>
- Camacho Donado, M. (2020). *Diseño de estaciones de recarga de agua potable en espacios públicos urbanos*. Universidad del Atlántico.
- Casa, D. J., Stearns, R. L., Lopez, R. M., Ganio, M. S., McDermott, B. P., & Armstrong, L. E. (2019). *Fluid Replacement for Athletes*. Journal of Athletic Training, 44(5), 551–561.
- Ciudad Región. (2025). *Restablecen servicio de agua en Zarzal y La Unión tras daño en el sistema Sara Brut*. (“Ciudad Región - Restablecen servicio de agua en Zarzal y La... | Facebook”) (“Restablecen servicio de agua en Zarzal y La Unión tras reparar daño en ...”) <https://ciudadregion.com/regiones/valle-del-cauca/norte-del-valle/restablecen-servicio-de-agua-en-zarzal-y-la-union-tras-reparar-dano-en-el-sistema-de-sara-brut>
- Contraloría Departamental del Valle del Cauca. (2017). *Informe de auditoría gubernamental con enfoque integral: Calidad del agua y estado de los sistemas de tratamiento en Zarzal*.
- DANE. (2018). *Infografía CNPV – Zarzal, Valle del Cauca*.
https://sitios.dane.gov.co/cnpv/app/views/informacion/perfiles/76895_infografia.pdf
- Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA). (2021). *El agua en el medio urbano*. <https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/areas/el-agua-en-el-medio-urbano>
- Gutiérrez, J., & Restrepo, M. (2022). *Aplicación del método AHP para la localización de infraestructura urbana en ciudades intermedias*. Revista de Ingeniería y Desarrollo, 40(2), 45–60.
- Inderval. (2024). *Mejoramiento de infraestructura deportiva en Zarzal*.
<https://inderval.gov.co/con-mejoramiento-de-infraestructura-deportiva-y-monitores-deportivos-gobierno-del-valle-fortalecera-a-zarzal>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & IDEAM. (2025). *Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)*.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2013). *Guías para la calidad del agua potable* (4.ª ed.).
- Organización Mundial de la Salud. (2022). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022*. (“PROGRESS ON HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE”) (“PROGRESS ON

HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE”) (“PROGRESS ON HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE”) (“PROGRESS ON HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE”) (“PROGRESS ON HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE”) (“PROGRESS ON HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE - UNICEF DATA”) <https://www.who.int>

- Pastrana-Miranda, J., & González-Caamal, M. (2022). *Herramientas multicriterio para la planificación de servicios públicos en zonas urbanas*. Revista Latinoamericana de Ingeniería, 18(1), 33–47.
- Rivera Castillo, L. (2017). *Movilidad urbana y acceso a servicios básicos en municipios intermedios*. Universidad del Valle.
- Salazar López, D., & Marín Cifuentes, A. (2016). *Diagnóstico de la infraestructura hídrica en municipios del Valle del Cauca*. Revista de Estudios Regionales, 12(3), 77–89.
- SIDAP CVC. (2025). *Área de Recreación La Corcova y sistema hídrico del río Cauca*. <https://www.cvc.gov.co>
- Universidad Católica de Colombia. (2021). *Estudio hidrológico para la construcción de planta de potabilización de agua en Zarzal, Valle del Cauca*.
- Urdampilleta, A., Martínez-Sanz, J. M., Julia-Sánchez, S., & Alvarez-Herms, J. (2013). *Hidratación y rendimiento deportivo: revisión de la literatura científica*. Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 13(51), 557–578.
- US Environmental Protection Agency (EPA). (2009). *Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models*. (“Guidance on the Development, Evaluation, and Application of ...”) (“Guidance on the Development, Evaluation, and Application of ...”) EPA/100/K-09/003.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Sistemas de salud para la seguridad sanitaria: marco para desarrollar las capacidades del Reglamento Sanitario Internacional*. (“Sistemas de salud para la seguridad sanitaria”) (“Sistemas de salud para la seguridad sanitaria: marco para desarrollar ...”) <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346357/9789240034891-spa.pdf>
- Fariña, J., Higuera, E. & Román, E. (2019). *Ciudad, Urbanismo y Salud: Documento técnico de criterios generales sobre parámetros de diseño urbano para alcanzar los objetivos de una ciudad saludable*. (“CIUDAD, URBANISMO Y SALUD - UPM”) (“CIUDAD, URBANISMO Y SALUD Documento técnico de criterios generales ...”) Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/65377/1/INVE_MEM_2019_323823.pdf
- ONU-Hábitat & OMS. (2021). *Integrar la salud en la planificación urbana y territorial: manual de consulta*. (“planificación urbana y territorial - UN-Habitat”) (“Integrar la salud en la planificación urbana y territorial: manual de ...”) https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/06/21116_spanish_integrating_health_in_urban_and_territorial_planning.pdf

- Mendoza Ludeña, L. (2024). *"Evaluación crítica del desarrollo sostenible en zonas urbanas de Latinoamérica: Revisión sistemática."* ("EVALUACIÓN CRÍTICA DEL DESARROLLO SOSTENIBLE EN ZONAS URBANAS DE ...") ("revistacientifica.fce.unam.edu.ar") Revista Científica Visión de Futuro, vol. 28, núm. 2. <https://www.redalyc.org/journal/3579/357977785009/>
- Duque Franco, I. & Montoya Garay, J. W. (2021). *Cambio climático y urbanización*. Cuadernos de Geografía, Universidad Nacional de Colombia. http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2021000200274
- Alimonda, H. (2002). *Ecología política. Naturaleza, sociedad y utopía*. Buenos Aires: CLACSO.
- Altieri, M. A. (1999). *Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable*. Montevideo: Editorial Nordan-Comunidad.
- Andamios. (2015). *Bibliografía sobre medio ambiente, ciencia y sociedad*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-00632015000300113
- Sánchez Gilede, J. C. & Vergara Barreto, J. D. (2021). *"Análisis de la viabilidad técnica y financiera de una muestra de proyectos de estudios y diseños del IDU."* ("Análisis de la viabilidad técnica y financiera de una muestra de ...") ("Análisis de la viabilidad técnica y financiera de una muestra de ...") Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstreams/24b2f00d-ad36-4a0f-b542-ea7931ea56c5/download>
- Caparrós Pérez, D. (2017). *Viabilidad para generar territorios sostenibles. Aplicación ecoeficiente de materiales y sistemas constructivos en los desarrollos y rehabilitaciones urbanísticos*. ("Viabilidad para generar territorios sostenibles. Aplicación ...") ("Viabilidad para generar territorios sostenibles. Aplicación ...") Universidad Católica San Antonio de Murcia. <https://repositorio.ucam.edu/bitstream/handle/10952/2436/Tesis.pdf?sequence=1>
- Corrales Grajales, O. A. & Mesa Mazo, J. J. (2008). *"Metodología para evaluar la factibilidad legal, comercial, técnica y financiera para desarrollar proyectos multifamiliares."* ("METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA FACTIBILIDAD LEGAL, COMERCIAL, TÉCNICA Y ...") ("(PDF) Metodología para evaluar la factibilidad legal, comercial ...") ("(PDF) Metodología para evaluar la factibilidad legal, comercial ...") Universidad de Medellín. https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/4216/TG_EGC_24.pdf?sequence=1
- Hernández Bonilla, M. (2010). *Participación ciudadana en el diseño urbano: hacia una planificación colaborativa*. Revista INVI, vol. 25, núm. 68. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-83582010000300004
- Rodríguez, J. & Rincón, D. (2018). *Percepción ciudadana sobre infraestructura urbana en espacios públicos*. Revista de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia. https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-03082018000100005

- Mesa García, S. C. (2021). *Medición y evaluación de seis criterios de sostenibilidad urbana (aspecto físico), en Bucaramanga, Colombia.* ("Medición y evaluación de seis criterios de sostenibilidad ... - Dialnet") ("Medición y evaluación de seis criterios de sostenibilidad urbana ...") Revista Ciudades, Estados y Política, vol. 8, núm. 3. http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2462-91032021000300015
- Linares, S. (coord.) (2016). *Soluciones espaciales a problemas sociales urbanos.* "Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires." ("Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires | UNICEN") ("UNICEN | Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires") ISBN: 978-950-658-392-7
- García Cuesta, J. L. (2004). *Análisis espacial de la complejidad del sistema urbano como soporte de una planificación y gestión urbana sostenibles.* ("(PDF) " ANÁLISIS ESPACIAL DE LA COMPLEJIDAD DEL SISTEMA URBANO COMO ...") ("(PDF) " ANÁLISIS ESPACIAL DE LA COMPLEJIDAD DEL SISTEMA URBANO COMO ...") XI Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección
- Gómez Delgado, M. (2012). *"Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con tecnologías de la información geográfica."* ("ANÁLISIS DE LA DINÁMICA URBANA Y SIMULACIÓN DE - ProQuest") ("ANÁLISIS DE LA DINÁMICA URBANA Y SIMULACIÓN DE - ProQuest") Editorial RA-MA. ISBN: 978-84-9964-125-6