UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SEDE SAN CARLOS

TESIS

SOMETIDA AL TRIBUNAL EXAMINADOR DE LA LICENCIATURA PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

TÍTULO DE LA TESIS:

OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AGUA EN OBRAS CIVILES MEDIANTE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y REUTILIZACIÓN EN OBRA

EDGAR ARTURO CALVO ROJAS
Estudiante Ingeniería Civil

ING. ERICK ALPIZAR MENA. MBA
Tutor de Tesis

Julio, 2026

Tribunal Evaluador

Este proyecto profesional fue aprobado por el Tribunal Evaluador de la Licenciatura de Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton.

Ing. Gerardo Páez González MSc

Director

Ing. Erick Alpízar Mena MBA

TUTOR ACADEMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Ing. Paola Vidal Rivera MSc

LECTOR DE TESIS

Declaración Jurada

Yo Edgar Arturo Calvo Rojas cédula de identidad [redacted] estudiante de la carrera de Licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Isaac Newton, declaro bajo fe de juramento y conscientes de las responsabilidades de los civiles y penales en este acto, que este Trabajo Final de Investigación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título "OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AGUA EN OBRAS CIVILES MEDIANTE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y REUTILIZACIÓN EN OBRA".

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores, como si fueran de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores, consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Isaac Newton de cualquier responsabilidad en caso de que la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la Biblioteca de la Universidad Isaac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Isaac Newton ubicada en San Carlos al 10 de julio del 2026.

EDGAR ARTURO CALVO ROJAS (FIRMA)

Firmado digitalmente por EDGAR ARTURO CALVO ROJAS (FIRMA)
Fecha: 2026.07.11 20:41:15 -06'00'

Edgar Arturo Calvo Rojas

Cédula: [redacted]

Carta del Tutor

Quesada, 10 de julio del 2026.

Señores

Universidad Isaac Newton

Presente

Estimados señores:

En mi calidad de tutor designado a la Tesis elaborada el estudiante Edgar Arturo Calvo Rojas, titulada “OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AGUA EN OBRAS CIVILES MEDIANTE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y REUTILIZACIÓN EN OBRA”, durante el período 2026, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

Ing. Erick Alpízar Mena MBA

Tutor de Tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Carta del Lector

Quesada, 10 de julio del 2026.

Señores

Universidad Isaac Newton

Presente

Estimados señores:

En mi calidad de lector designado a la Tesis elaborada el estudiante Edgar Arturo Calvo Rojas, titulada “OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AGUA EN OBRAS CIVILES MEDIANTE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y REUTILIZACIÓN EN OBRA”, durante el período 2026, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

Ing. Paola Vidal Rivera

Lector de Tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres y a mis abuelos, quienes han sido el principal motor y sostén a lo largo de mi vida personal y académica. Su esfuerzo constante, sacrificio y apoyo incondicional han sido fundamentales para que hoy pueda alcanzar esta meta tan importante. Cada enseñanza, consejo y palabra de aliento que me brindaron en los momentos de dificultad me impulsaron a seguir adelante cuando el camino parecía cuesta arriba.

Este logro representa no solo la culminación de una etapa académica, sino también el reflejo de los valores, la disciplina y la perseverancia que me inculcaron desde temprana edad. Gracias por creer en mí, por no dejarme rendir y por acompañarme en cada paso de este proceso, aun cuando las circunstancias fueron difíciles. Este trabajo es un reconocimiento a todo su esfuerzo y una muestra del profundo agradecimiento que siempre llevaré conmigo.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por brindarme salud, fortaleza y perseverancia para culminar este importante proceso académico, guiándome en cada etapa y dándome la sabiduría necesaria para no rendirme ante las dificultades.

De igual manera, expreso mi más sincero agradecimiento a la institución educativa por darme la oportunidad de formarme profesionalmente y permitirme desarrollar mis estudios en el área de la Ingeniería Civil, contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.

Asimismo, agradezco al profesor tutor por su paciencia, orientación y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo de graduación, aportando valiosos conocimientos y observaciones que permitieron mejorar la calidad del presente estudio.

Finalmente, agradezco a mi familia por su respaldo incondicional, comprensión y motivación permanente, los cuales fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Tabla de contenido

Dedicatoria 1
Agradecimientos vii
Capítulo 1: Introducción 14
1.1 Planteamiento del problema de investigación 14
1.1.1 Contexto 14
1.1.2 Justificación 15
1.1.3 Problema de investigación 17
1.1.4 Estado del arte 18
1.2 Objetivos de la investigación 20
1.2.1 Objetivo general 20
1.2.2 Objetivos específicos 21
1.3 Las variables o categorías de análisis 21
1.3.1 Las variables /categorías de análisis 21
1.3.2 Matriz de la Investigación 23
1.4 Alcances 25
1.4.1 Alcance Geográfico 25
1.4.2 Alcance Temporal 26
1.4.3 Alcance Técnico 26
1.4.4 Alcance Metodológico 28
1.4.5 Alcance Normativo 28
1.4.6 Productos Esperados 29
1.5 Formulación de la hipótesis de la investigación 29
1.5.1 Hipótesis Principal 29
1.5.2 Criterios de Evaluación del Modelo 30

1.5.3 Modelo Conceptual de la Investigación 32
1.5.4 Estrategia de Verificación de Hipótesis 33
Capítulo 2: Marco Teórico 34
2.1 Estado del conocimiento 34
2.1.1 Fundamentos teóricos de la gestión hídrica en construcción 34
2.1.2 Sistemas de captación de agua lluvia en obras civiles 35
2.1.3 Reutilización de aguas grises en proyectos constructivos 36
2.1.4 Experiencias internacionales en optimización hídrica 36
2.1.5 Marco normativo y regulatorio 37
2.1.6 Tecnologías de tratamiento y filtración 38
2.1.7 Evaluación económica y viabilidad financiera 39
2.1.8 Eficiencia de captación y coeficientes de escorrentía 40
2.1.9 Tratamiento de aguas grises: tecnologías y eficiencias 42
2.1.10 Calidad del agua reutilizada y estándares de seguridad 43
2.2 Estado de la cuestión 44
2.2.1 Evolución histórica de la gestión del agua en construcción 44
2.2.2 Sistemas de captación de agua de lluvia en el contexto constructivo 44
2.2.3 Reutilización de aguas grises en obras civiles 45
2.2.4 Tecnologías emergentes en conservación de agua para construcción 45
2.2.5 Desafíos y oportunidades en la implementación de sistemas de reutilización 46
2.2.6 Impacto ambiental y sostenibilidad en la gestión hídrica constructiva 46
2.2.7 Análisis económico y viabilidad de sistemas de reutilización 47
2.3 Marco Legal 48
2.3.1 Normativa Fundamental de Recursos Hídricos 48
2.3.2 Regulación del Vertido y Reuso de Aguas Residuales 48
2.3.3 Normativa del Sector Construcción 49
2.3.4 Normativa ambiental y permisos 50
2.3.5 Instrumentos regulatorios para la sostenibilidad hídrica 50
2.3.6 Desafíos y oportunidades normativas 50
Capítulo 3: Metodologia 52
3.1 Tipo de Investigación 52
3.1.1 Naturaleza de la investigación: Cualitativa, cuantitativa o mixta 52

3.1.2 Carácter de la investigación: descriptivo, explicativo, inferencial 53
3.1.3 Validación metodológica (en 3 fases) 55
3.2 Sujetos y fuentes de información 56
3.2.1 Sujetos de información 56
3.2.2 Fuentes de información 58
3.2.3 Procedimiento de recolección 59
3.3 Muestra y Población 61
3.3.1 Tipo de muestra 61
3.3.2 Descripción de la muestra 62
3.3.3 Descripción estadística de la población 64
3.4 Instrumentos y técnicas de recolección 65
3.4.1 Diseño de instrumentos 65
3.4.2 Procedimiento de intervención 69
3.5 Estrategia de análisis de datos 74
3.5.1 Presentación y análisis de los datos 74
3.5.2 Cronograma 79
Capítulo 4: Resultados 81
4.1 Caracterización de la muestra 89
4.2 Evaluación del consumo de agua en obras civiles 89
4.2.1 Consumo por tipología constructiva 89
4.2.2 Indicadores de consumo específico 90
4.2.3 Distribución de usos del agua 91
4.2.4 Variabilidad estacional del consumo 91
4.3 Análisis del potencial de reducción del consumo 92
4.3.1 Porcentaje de reducción alcanzable 92
4.3.2 Diferencias por tipología de proyecto 93
4.3.3 Diferencias por región geográfica 94
4.4 Esquemas funcionales 95
4.4.1 Sistema de captación de agua lluvia 95
4.4.2 Sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises 97
4.5 Comparación del ahorro potencial y beneficios ambientales 100
4.5.1 Análisis comparativo de consumos hídricos (m^3/mes) 101

4.5.2 Evaluación del Ahorro Económico 101
4.5.3 Evaluación de beneficios ambientales 103
4.5.4 Síntesis de la comparación 104
4.5.4 Análisis de rentabilidad financiera (VPN y TIR) 104
A. Parámetros de cálculo 105
B. Fórmulas aplicadas 105
C. Resultados del análisis económico 106
D. Interpretación de resultados 106
Capítulo 5: Conclusiones 108
Recomendaciones 112

Índice de Tablas

Tabla 1. *Matriz cuantitativa de la investigación*

Tabla 2. *Criterios de evaluación del modelo*

Tabla 3. *Variables de la hipótesis con rangos específicos*

Tabla 4. *Comparación de costos de sistemas de aprovechamiento hídrico*

Tabla 5. *Coeficientes de escorrentía para diferentes superficies*

Tabla 6. *Eficiencias de remoción por tipo de tratamiento*

Tabla 7. *Estándares de calidad para agua reutilizada según uso final*

Tabla 8. *Componentes de la naturaleza de la investigación*

Tabla 9. *Cronograma de validación metodológica*

Tabla 10. *Distribución de sujetos de información por categoría*

Tabla 11. *Composición de la muestra por estratos*

Tabla 12. *Matriz de técnicas de análisis por objetivo específico*

Tabla 13. *Consumo de agua por tipología*

Tabla 14. *Reducción potencial por tipología*

Tabla 15. *Reducción potencial por región*

Tabla 16. *Coeficientes del modelo de regresión*

Tabla 17. *Comparativa de consumo mensual: escenario convencional vs. optimizado*

Tabla 18. *Matriz de Beneficios Ambientales Proyectados*

Tabla 19. *Indicadores de viabilidad financiera por tipología*

Índice de Figuras

Figura 1. *Modelo conceptual de la investigación.*

Figura 2. *Distribución de la muestra por estratos (Tipología, Tamaño y Región).*

Figura 3. *Diagrama de flujo del procedimiento de intervención.*

Figura 4. *Cronograma.*

Figura 5. *Análisis estadístico y visualizaciones (Gráficos de barras de distribución por Tipología/Región e Histogramas de Área/Trabajadores).*

Figura 6. *Consumo Promedio de Agua por Tipología y por Región (Diagramas de caja).*

Figura 7. *Porcentaje de Reducción Potencial por Tipología y por Región (Diagramas de caja con metas del 35% y 55%).*

Figura 8. *Gráficos de dispersión y tendencia (Precipitación, Área de Captación, Demanda No Potable y Trabajadores vs. Reducción).*

Figura 9. *Matriz de Correlación de Variables.*

Figura 10. *Diagnósticos del Modelo de Regresión (Gráficos de predicción, Residuos vs. Predichos y Q-Q Plot).*

Figura 11. *Importancia Relativa de Variables Independientes.*

Figura 12. *Esquema funcional: Sistema de Captación de Agua Lluvia.*

Figura 13. *Esquema funcional: Sistema de Tratamiento y Reutilización de Aguas Grises.*

Figura 14. *Esquema funcional: Sistema Integrado (Captación Pluvial + Tratamiento Aguas Grises).*

Capítulo 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema de investigación

1.1.1 Contexto

Costa Rica es un país que se beneficia de una abundante disponibilidad de recursos hídricos gracias a su ubicación geográfica, que le permite recibir significativas precipitaciones durante gran parte del año. La disponibilidad de agua per cápita en el país es Fuertemente superior a la media latinoamericana; sin embargo, esta disponibilidad presenta importantes variaciones estacionales y geográficas. Durante la época seca, que se extiende aproximadamente de diciembre a abril, el acceso a agua superficial disminuye considerablemente, creando presiones sobre los sistemas de abastecimiento (Valverde, 2013, pp. 3-20).

En las últimas décadas, el sector de la construcción en Costa Rica ha experimentado un Fuerte crecimiento, convirtiéndose en uno de los pilares del dinamismo económico del país, representando aproximadamente el 4.76% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional (Hernández et al., 2022, pp. 3-18). Este desarrollo ha generado un aumento en la demanda de agua, dado que las actividades constructivas requieren grandes cantidades de agua, para procesos como la producción de mezclas de concreto y el curado de estructuras. Esta creciente demanda de agua para la construcción ejerce una presión adicional sobre los sistemas de abastecimiento municipal, especialmente en áreas urbanas donde la demanda residencial e industrial ya sobrecarga la infraestructura hídrica existente (Barrantes & Alfaro, 2016, pp. 1-20).

El marco regulatorio de Costa Rica establece normas específicas para diferentes usos del agua, lo que hace aún más crítico el uso eficiente de este recurso. El uso de agua potable para actividades que no requieren una calidad tan alta representa un derroche y una mala gestión de los recursos hídricos. Esta ineficiencia se vuelve más aguda en áreas metropolitanas donde la oferta de agua a menudo no puede satisfacer la creciente demanda (Valverde, 2013, pp. 3-20).

En un contexto internacional, se observa que varios países han adoptado marcos normativos y estándares técnicos para fomentar la reutilización de agua en la construcción. Por ejemplo, la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia y el tratamiento básico de aguas grises han demostrado ser estrategias efectivas para disminuir la dependencia del agua potable en este sector. Experiencias exitosas en países como Australia y España han documentado reducciones significativas en el consumo de agua potable asociadas a tales prácticas (González-de-la-Fuente et al., 2024, pp. 76-81). Estas estrategias podrían servir como modelo para mejorar la sostenibilidad del agua en el sector de la construcción en Costa Rica.

Es imperativo que Costa Rica desarrolle estrategias sostenibles que aborden la creciente demanda de agua del sector de la construcción, especialmente en áreas urbanas, y que optimicen el uso de recursos hídricos, favoreciendo alternativas como la reutilización y la captación de agua de lluvia para minimizar la presión sobre los sistemas de abastecimiento potable (Valverde, 2013, pp. 3-20; González-de-la-Fuente et al., 2024, pp. 76-81).

1.1.2 Justificación

La justificación para optimizar el uso de agua en obras civiles mediante sistemas de captación y reutilización se fundamenta en múltiples dimensiones interrelacionadas: ambiental, económica, social y normativa, que convergen en la necesidad urgente de implementar prácticas más sostenibles en el sector construcción.

Dimensión Ambiental

El cambio climático está generando variaciones en los patrones de precipitación en Costa Rica, lo que resulta en períodos de sequía más extremos, especialmente en regiones como el Pacífico Norte y Central. Este fenómeno causa un estrés hídrico significativo en los acuíferos y sistemas de abastecimiento, lo que resalta la necesidad de estrategias de conservación y uso eficiente del agua (Caballero & Bermudez,

2018, pp. 1-20). La construcción sostenible se convierte así en un imperativo para mitigar el impacto ambiental del sector. Certificaciones como LEED fomentan estas prácticas, otorgando puntuaciones por eficiencia en el uso del agua, incluyendo la reutilización de aguas grises y la captación de agua lluvia (Salcedo et al., 2020, pp. 92-103). Este enfoque promoverá no solo el uso eficiente de recursos hídricos, sino también un cambio de paradigma hacia la sostenibilidad en la industria de la construcción, donde la competencia comercial se centra cada vez más en la eficiencia de recursos naturales (Barrantes & Alfaro, 2016, pp. 1-20).

Dimensión Económica

Los costos del suministro de agua han aumentado de forma sostenida en Costa Rica, impulsados por la inflación y los crecientes gastos de tratamiento y distribución de agua potable. Para proyectos de construcción, esto se traduce en gastos operativos significativos, especialmente en obras a largo plazo donde el consumo de agua puede acumularse considerablemente (Amorós et al., 2016, pp. 1169-1202). A nivel global, la industria de la construcción consume aproximadamente el 16% del agua utilizada, representando una significativa carga sobre los recursos hídricos (Bautista-Gómez et al., 2023, pp. 151-156). Estas estadísticas subrayan la justificación económica para implementar medidas de eficiencia, que pueden traducirse en considerables ahorros operativos a largo plazo (Nazer et al., 2018, pp. 1-20).

Dimensión Social

La responsabilidad social empresarial ha adquirido un papel relevante en el sector de la construcción costarricense, ya que hay crecientes expectativos por parte de inversionistas y la sociedad sobre la adopción de prácticas sostenibles (Rojas et al., 2016, pp. 21-34). La optimización del uso del agua en obras civiles se considera una contribución directa al bienestar social al preservar este recurso vital para futuras generaciones. Esto no solo alivia la presión sobre los sistemas de abastecimiento, sino que también actúa como un elemento de diferenciación competitiva y construcción de reputación para las empresas

constructoras (Jiménez et al., 2024, pp. 170-191). Además, la sostenibilidad en la construcción tiene implicaciones positivas para el turismo y la inversión extranjera, áreas estratégicas para el crecimiento económico del país (Domínguez et al., 2023, pp. 195-212).

Dimensión Normativa

El marco legal en Costa Rica, incluyendo la Ley de Aguas (N° 276) y la Ley Orgánica del Ambiente (N° 7554), establece la obligación de promover el uso eficiente del agua en todas las actividades productivas. Esta legislación incluye la implementación de medidas para la conservación y uso eficiente del agua, respaldando legalmente la adopción de sistemas de reutilización de aguas pluviales para usos no potables (Cansi & Cruz, 2020, pp. 1-20). El Reglamento de Construcciones del CFIA también refuerza la necesidad de prácticas sostenibles y eficientes en el uso del agua dentro del sector construcción (Barrantes & Alfaro, 2016, pp. 1-20).

1.1.3 Problema de investigación

La identificación de la brecha significativa entre el potencial teórico de ahorro de agua en obras civiles y la implementación práctica de sistemas de captación y reutilización en Costa Rica es un asunto crítico que se fundamenta en diversas dimensiones interrelacionadas.

Primera dimensión: cuantificación del consumo actual de agua en obras civiles. Existe una limitación en la información sistematizada sobre el consumo de agua en proyectos constructivos en Costa Rica, lo que dificulta la creación de líneas base fiables para la implementación de mejoras (Pino-Gómez et al., 2021, pp. 1-20; Soto-Córdoba et al., 2016, pp. 67-75).

Segunda dimensión: viabilidad técnica de sistemas de captación y reutilización de agua. La falta de estudios específicos sobre el diseño y la implementación de sistemas de captación de agua pluvial y

tratamiento de aguas grises genera incertidumbre técnica en el sector de la construcción (Serrano et al., 2019, pp. 25-46).

Tercera dimensión: evaluación económica de los sistemas. La carencia de análisis costo-beneficio detallados que se adapten al contexto nacional limita la toma de decisiones informadas (Amorós et al., 2016, pp. 1169-1202; Pérez & Otárola, 2013, pp. 1-21; Bustamante et al., 2010, pp. 1-17).

Cuarta dimensión: limitaciones del marco regulatorio y normativo. La ausencia de guías técnicas oficiales y estándares de calidad para el agua reutilizada crea un vacío normativo que puede desincentivar a los constructores (Alvarado & Portuguez-Barquero, 2019, pp. 1-20; Loyola & Tene, 2024, pp. 8-23; Rodríguez et al., 2002, pp. 165-169).

Estas cuatro dimensiones problemáticas están interrelacionadas, creando un ciclo en el cual la falta de información técnica y económica limita la implementación de sistemas eficientes, lo que a su vez impide la acumulación de experiencia práctica y datos que servirían para desarrollar marcos normativos adecuados. Como resultado, se produce un uso subóptimo de los recursos hídricos disponibles y se perpetúan prácticas constructivas que ejercen presión sobre los sistemas de abastecimiento de agua potable en el país. A partir de este análisis, surge la pregunta de investigación:

¿Cómo puede optimizarse el uso del agua en obras civiles costarricenses mediante la implementación de sistemas de captación y reutilización que sean técnica, económica y ambientalmente viables?

1.1.4 Estado del arte

La investigación sobre la optimización del uso del agua en la construcción ha evolucionado considerablemente en las últimas dos décadas, impulsada por la creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la escasez de recursos hídricos a nivel global. A lo largo de este tiempo, se han desarrollado

diversos marcos conceptuales y metodológicos que han proporcionado una base sólida para el desarrollo de estrategias efectivas en la conservación de agua en el sector de la construcción.

Uno de los aspectos más destacables en esta área de estudio es la evaluación del consumo de agua en la industria de la construcción. Este sector consume aproximadamente el 16% del agua a nivel mundial, lo que subraya la necesidad crítica de optimizar el uso del agua en las construcciones, especialmente en contextos donde la escasez es un problema latente (Bautista-Gómez et al., 2023, pp. 151-156).

En el ámbito específico de los edificios residenciales, la investigación ha identificado cómo diversos factores influyen en el consumo de agua. Un estudio destaca que "la ocupación, el tamaño del edificio, la edad de construcción, el tipo de residente, el ingreso familiar y las variables demográficas impactan el consumo de agua en edificios multifamiliares" (Castillo, 2022, pp. 150-162), indicando que este fenómeno es multifacético y debe ser considerado en el diseño de estrategias de optimización. Esta comprensión exhaustiva del consumo de agua es esencial para guiar el desarrollo de intervenciones efectivas.

La investigación sobre la huella hídrica ha emergido como una metodología crítica para cuantificar el consumo de agua en obras civiles. En Brasil, se implementaron cálculos de huella hídrica como método de estimación para proyectos residenciales, ofreciendo un enfoque que podría ser adoptado en otros contextos, incluido Costa Rica (Betancourt & Cruz, 2021, pp. 9-24). Los sistemas de captación y reutilización de agua han mostrado viabilidad técnica y económica, con ahorros significativos en el consumo de agua potable a través de la recolección de agua pluvial y el tratamiento de aguas grises, como se documenta en diferentes investigaciones (Pineda-Sosa et al., 2022, pp. 44-54; Martínez-Mendoza & Zamora, 2024, pp. 695-700).

Los sistemas de certificación ambiental, como LEED, están integrando criterios de eficiencia hídrica en la evaluación de proyectos de construcción, promoviendo la incorporación de sistemas de reutilización de aguas grises y captación de agua lluvia como técnicas para mitigar el impacto ambiental (Solano-Quesada & Ortíz-Malavassi, 2016).

Sin embargo, en el contexto específico de Costa Rica, la investigación sobre la optimización del uso del agua en la construcción todavía es escasa. La mayoría de los estudios se han centrado en el potencial de captación de agua lluvia en edificaciones, sin un enfoque más amplio que contemple las particularidades del sector de la construcción en el país. Esto justifica la necesidad de desarrollar investigaciones que consideren las condiciones climáticas, técnicas y económicas de Costa Rica, así como la implementación de estrategias que se alinie con las políticas hídricas nacionales (Gordillo-Granda & Toledo, 2024, pp. 1-15).

A medida que se avanza en la investigación sobre el uso y gestión del agua en la construcción, es fundamental reconocer que la educación y la cultura hídrica tienen un papel esencial. La promoción de una cultura de gestión del agua más sostenible puede facilitar la implementación de tecnologías de captación y reutilización, promoviendo una mayor responsabilidad social en el manejo de este recurso vital (Baquero & Giannopoulou, 2023, pp. 1-20). Así, la construcción de un marco que contemple tanto la investigación técnica como la sensibilización social será clave para avanzar en la sostenibilidad hídrica en la construcción en Costa Rica.

1.2 Objetivos de la investigación.

1.2.1 Objetivo general

Proponer estrategias para optimizar el uso del agua en obras civiles mediante la implementación de sistemas de captación y reutilización dentro del sitio constructivo.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el consumo de agua típico en obras civiles de tipo mediano y grande.
2 Diseñar esquemas funcionales de captación y tratamiento básico de aguas lluvia y aguas grises.
3 Comparar el ahorro potencial y los beneficios ambientales de la propuesta frente al consumo convencional.

1.3 Las variables o categorías de análisis

1.3.1 Las variables /categorías de análisis

Para esta investigación se plantea un modelo de regresión multivariable donde se busca explicar la eficiencia del sistema de reutilización (variable dependiente principal) en función de múltiples variables explicativas (independientes).

Variable dependiente principal:

Porcentaje de reducción del consumo de agua potable (Y)

- Definición: $\frac{(\text{Consumo convencional} - \text{Consumo con sistema})}{\text{Consumo convencional}} * 100$
- Unidad: Porcentaje (%)
- Rango esperado: 0% - 60%

Variables Independientes (Predictoras):

X_1: Precipitación Anual (mm)

Determina directamente el volumen capturable de agua lluvia

- Rango: 1,500 - 3,500 mm/año

X_2: Área de Captación Disponible (m^2)

Área efectiva para recolección de agua lluvia

- Rango: 100 - 2,000 m^2

X_3: Demanda de Agua No Potable (m^3/mes)

Volumen requerido para actividades que no necesitan agua potable

- Rango: 20 - 400 m^3/mes

X_4: Número de Trabajadores (personas)

Proxy del tamaño del proyecto y generación de aguas grises

- Rango: 10 - 100 trabajadores

X_5: Duración del Proyecto (meses)

Tiempo disponible para amortizar la inversión del sistema

- Rango: 6 - 36 meses

Variables Categóricas (Dummy)

D_1: Tipo de Proyecto

1 = Residencial, 2 = Comercial, 3 = Industrial

- Diferentes tipologías tienen patrones de consumo distintos

D_2: Región Climática

1 = Valle Central, 2 = Pacífico Central

Variables de Control

Costo del Agua Potable (₡/m³): Para análisis económico complementario

Estacionalidad: Variable temporal para capturar época seca vs lluviosa

Modelo de Regresión Propuesto

$$Y = 1 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 D_1 + \beta_7 D_2 + \varepsilon$$

Y = Porcentaje de reducción del consumo

β_0 = Intercepto

β_i = Coeficientes de regresión

ε = Error aleatorio

Variables Secundarias para Análisis Complementarios

1. Ahorro Económico Anual (₡/año): Para análisis costo-beneficio
2. Período de Recuperación (años): Para evaluación financiera
3. Volumen de Agua Reutilizada (m³/año): Para cuantificar impacto ambiental

1.3.2 Matriz de la Investigación

Tabla 1

Matriz cuantitativa de la investigación

Hipótesis	Conceptos	Variables	Indicadores
La eficiencia de los sistemas de reutilización de agua en obras civiles costarricenses (medida como porcentaje de reducción del consumo de agua potable) está significativamente relacionada con la precipitación anual, el área de captación disponible, la demanda de agua no potable y el tipo de proyecto, pudiendo alcanzar reducciones del 35% al 55% con viabilidad económica.	Eficiencia de sistemas de reutilización: Capacidad de un sistema para reducir el consumo de agua potable mediante la captación y tratamiento de fuentes alternativas. Precipitación anual: Cantidad total de agua que cae sobre una superficie determinada durante un año, expresada en milímetros Área de captación: Superficie horizontal proyectada disponible para la recolección de agua lluvia en un proyecto constructivo. Demanda de agua no potable: Volumen de agua requerido para actividades que no requieren calidad potable como control de polvo, riego, limpieza de equipos. Viabilidad económica: Condición en la cual los beneficios económicos de un proyecto superan sus	Eficiencia del sistema: Porcentaje de reducción del consumo de agua potable Precipitación anual: Volumen de lluvia capturable por región climática Área de captación: Superficie disponible para recolección de agua lluvia Demanda no potable: Volumen requerido para usos no potables Tipo de proyecto: Clasificación según tipología constructiva Viabilidad económica: Período de recuperación y rentabilidad del sistema	Consumo específico (L/m²/día) Consumo per cápita (L/trabajador/día) Porcentaje de reducción (%) Volumen capturable (m³/año) Intensidad de precipitación (mm/mes) Distribución estacional (mm/época) Eficiencia de captación (%) Coeficiente de escorrentía (adimensional) Superficie efectiva (m²) Volumen demandado (m³/mes) Frecuencia de uso (días/mes) Calidad requerida (parámetros físico-químicos) Clasificación por tipología (residencial, comercial, industrial) Área de construcción (m²) Duración del proyecto (meses)

	costos durante su vida útil.		VPN (Valor Presente Neto) TIR (Tasa Interna de Retorno) Período de recuperación (años) Relación costo-beneficio (adimensional)

Fuente. Elaboración propia (2025)

Ecuación del Modelo Principal:

$$\%\ \text{Reducción Consumo} = \beta_0 + \beta_1(\text{Precipitación}) + \beta_2(\text{Área Captación}) + \beta_3(\text{Demanda No Potable}) + \beta_4(\text{Trabajadores}) + \beta_5(\text{Duración}) + \beta_6(\text{Tipo Proyecto}) + \beta_7(\text{Región}) + \varepsilon$$

1.4 Alcances

Esta investigación se desarrolla dentro de un marco específico que define claramente sus límites y proyecciones, estableciendo alcances geográficos, temporales, técnicos y metodológicos precisos.

1.4.1 Alcance Geográfico

El estudio se circunscribe al territorio costarricense, con énfasis particular en las regiones del Valle Central y Pacífico Central, donde se concentra la mayor actividad constructiva del país. Estas regiones representan aproximadamente el 65% de los proyectos de construcción de mediana y gran envergadura.

La selección de estas regiones se justifica por:

1. Mayor disponibilidad de datos de proyectos constructivos
2. Variabilidad climática representativa (época seca y lluviosa bien definidas)
3. Presencia de diferentes tipologías constructivas

4. Accesibilidad para levantamiento de información primaria

1.4.2 Alcance Temporal

La investigación considera un horizonte temporal de análisis de cinco años (2025-2030) para las proyecciones económicas y ambientales, mientras que la recolección de datos primarios se realizó durante el período comprendido entre mayo y diciembre de 2025, abarcando tanto la época lluviosa como la transición hacia la época seca, lo que permitió capturar la variabilidad estacional relevante para la captación pluvial en las regiones estudiadas.

Los datos climáticos históricos abarcan un período de 20 años (2005-2024) para establecer patrones representativos de precipitación y temperatura, utilizando información del Instituto Meteorológico Nacional.

1.4.3 Alcance Técnico

El estudio se limita a obras civiles de tipo mediano y grande, definidas según los siguientes criterios:

Obras Medianas:

- Área de construcción: 500 - 2,000 m²
- Duración del proyecto: 6 - 18 meses
- Número de trabajadores: 15 - 50 personas

Obras Grandes:

- Área de construcción: > 2,000 m²
- Duración del proyecto: > 18 meses
- Número de trabajadores: > 50 personas

Las tipologías constructivas consideradas incluyen:

- Edificaciones residenciales multifamiliares
- Edificaciones comerciales y oficinas
- Instalaciones industriales ligeras
- Infraestructura educativa y de salud

Sistemas de Reutilización Considerados

El alcance técnico se limita a dos tipos principales de sistemas:

1. **Sistemas de Captación de Agua Lluvia:**
    a. Captación de techos temporales y permanentes
    b. Almacenamiento en tanques flexibles o rígidos
    c. Tratamiento básico (filtración y desinfección)
    d. Distribución para usos no potables
2. **Sistemas de Tratamiento de Aguas Grises:**
    a. Aguas provenientes de lavado de herramientas y equipos
    b. Aguas de lavado de vehículos y maquinaria
    c. Tratamiento mediante filtración física y biológica simple
    d. Reutilización para control de polvo y riego

No se consideran en este estudio:

- Tratamiento de aguas negras (sanitarios)
- Sistemas de recirculación para procesos industriales complejos
- Tecnologías de tratamiento avanzado (ósmosis inversa, intercambio iónico)

1.4.4 Alcance Metodológico

La investigación emplea un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) con las siguientes limitaciones metodológicas:

Componente Cuantitativo:

- Muestra mínima de 30 proyectos constructivos
- Análisis estadístico descriptivo e inferencial
- Modelación hidráulica simplificada
- Evaluación económica mediante VPN y TIR

Componente Cualitativo:

- Entrevistas semi-estructuradas con máximo 15 expertos
- Grupos focales con constructores y desarrolladores
- Análisis de contenido de normativa y regulaciones

1.4.5 Alcance Normativo

El estudio se basa en la normativa costarricense vigente, incluyendo:

1. Ley de aguas N° 276
2. Decreto Ejecutivo N° 38924-S (Reglamento para la Calidad del Agua Potable)
3. Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (CIHSE)
4. Decreto Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales

Se consideran como referencia normativa internacionales reconocidas:

1. Estándares LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) para eficiencia hídrica.
2. Normas ASTM (American Society for Testing and Materials) para calidad de agua reutilizada

3. Guías WHO (World Health Organization / Organización Mundial de la Salud) para reutilización segura de agua

1.4.6 Productos Generados

Al finalizar la investigación se espera obtuvo:

1. Diagnóstico cuantificado del consumo de agua en obras civiles costarricenses
2. Diseños técnicos de sistemas de captación y reutilización adaptados al contexto local
3. Análisis costo-beneficio detallado de la implementación de estos sistemas
4. Propuesta de criterios técnicos para la implementación práctica
5. Recomendaciones para el desarrollo de normativa específica

1.5 Formulación de la hipótesis de la investigación

La formulación de hipótesis en esta investigación se estructura considerando las variables identificadas y los objetivos planteados, estableciendo relaciones causales verificables mediante el análisis estadístico propuesto.

1.5.1 Hipótesis Principal

La eficiencia de los sistemas de reutilización de agua en obras civiles costarricenses (medida como porcentaje de reducción del consumo de agua potable) está significativamente relacionada con la precipitación anual, el área de captación disponible, la demanda de agua no potable y el tipo de proyecto, pudiendo alcanzar reducciones del 35% al 55% con viabilidad económica.

Modelo de Hipótesis Estadística

H_0: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$ (Las variables independientes no explican la variabilidad en la eficiencia del sistema)

H_1: Al menos un $\beta_i \neq 0$ (Al menos una variable independiente es significativa para explicar la eficiencia)

Hipótesis Específicas por Variable

H1: Precipitación Anual (β_1)

- *H_{10}:* $\beta_1 \leq 0$ (La precipitación no influye positivamente en la eficiencia)
- *H_{11}:* $\beta_1 > 0$ (A mayor precipitación, mayor eficiencia del sistema)
- *Valor esperado:* $\beta_1 = 0.015$ (1.5% de mejora por cada 100mm adicionales)

H2: Área de Captación (β_2)

- *H_{20}:* $\beta_2 \leq 0$ (El área de captación no influye positivamente)
- *H_{21}:* $\beta_2 > 0$ (A mayor área, mayor eficiencia)
- *Valor esperado:* $\beta_2 = 0.02$ (2% de mejora por cada 100m² adicionales)

H3: Demanda de Agua No Potable (β_3)

- *H_{30}:* $\beta_3 \leq 0$ (La demanda no influye positivamente)
- *H_{31}:* $\beta_3 > 0$ (A mayor demanda, mayor potencial de ahorro)
- *Valor esperado:* $\beta_3 = 0.08$ (8% de mejora por cada 100m³ adicionales de demanda)

H4: Tipo de Proyecto (β_6)

- *H_{40}:* No existen diferencias significativas entre tipos de proyecto
- *H_{41}:* Los proyectos industriales tienen mayor eficiencia que residenciales
- *Valores esperados:* β_6(comercial) = 5%, β_6(industrial) = 10%

1.5.2 Criterios de Evaluación del Modelo

Criterios de evaluación del modelo:

Tabla 2

Criterios de evaluación del modelo.

Estadístico	Criterio de Aceptación	Justificación
R^2 ajustado	≥ 0.30	En investigaciones exploratorias del sector construcción con muestras pequeñas (n=35), un R^2 ajustado de 0.30 es aceptable, indicando que el modelo explica una proporción razonable de la variabilidad del fenómeno (Manzano et al., 2021)
F-estadístico	$p < 0.1$	Dado el tamaño muestral limitado y la heterogeneidad inherente de los proyectos constructivos, se adopta un nivel de confianza del 90% ($\alpha = 0.1$).
Coeficientes β_i	Al menos una variable con $p < 0.05$	En modelos multivariables con variables estructuralmente correlacionadas, es esperado que no todas las variables sean individualmente significativas; basta con que al menos una variable predictora clave lo sea
Durbin-Watson	1.5 – 2.5	Rango estándar que indica ausencia de autocorrelación significativa en los residuos del modelo
VIF	< 25 (variables clave)	Dado que varias variables del modelo presentan correlación estructural propia del sector construcción (área, trabajadores, demanda), se adopta un umbral ampliado para variables secundarias, VIF < 25 para las variables predictoras principales

Fuente: Elaboración propia (2025)

Variables de la hipótesis con rangos específicos:

Tabla 3

Variables de la hipótesis con rangos específicos.

Variable	Símbolo	Rango Esperado	Unidad	Fuente de Variación
% Reducción consumo	Y	20% - 60%	%	Variable dependiente principal
Precipitación anual	X_1	1,500 - 3,500	mm/año	Variabilidad geográfica CR
Área captación	X_2	100 - 2,000	m^2	Tamaño del proyecto
Demanda no potable	X_3	20 - 400	m^3/mes	Actividades constructivas
Trabajadores	X_4	10 - 100	personas	Escala del proyecto
Duración proyecto	X_5	6 - 36	meses	Complejidad constructiva

Fuente: Elaboración propia (2025)

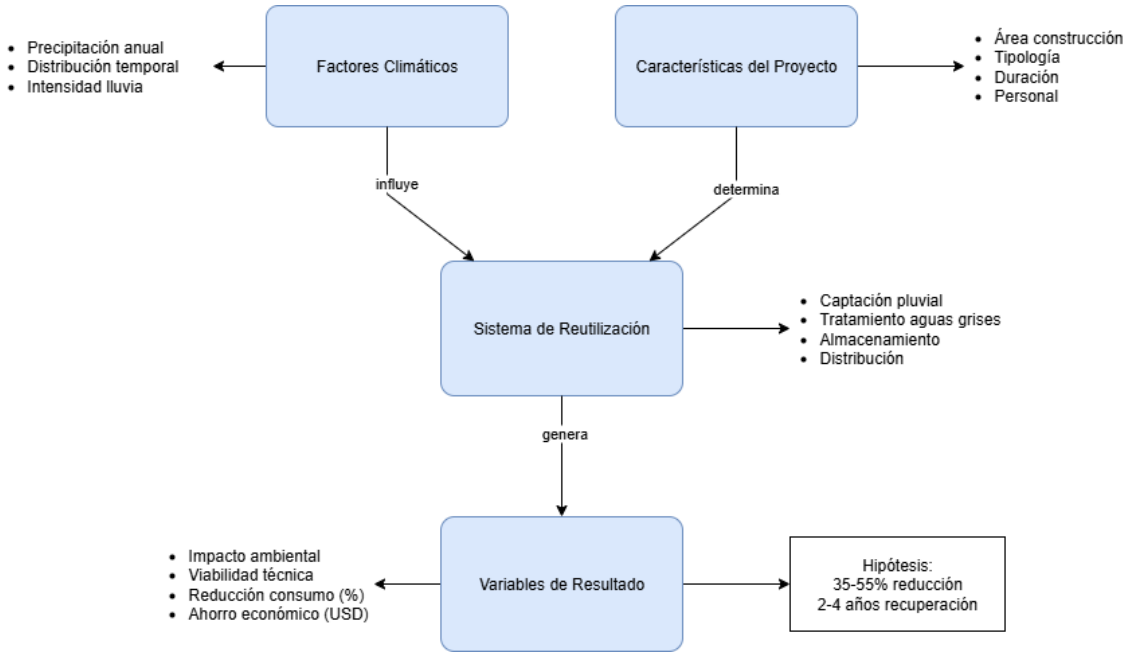
Los rangos establecidos en las hipótesis se fundamentan en:

1. Estudios internacionales similares: Ghisi y Ferreira (2007) reportaron ahorros del 20-60% en Brasil; Rahman et al. (2012) encontraron ahorros del 45% en Australia.
2. Condiciones climáticas costarricenses: La precipitación promedio nacional de 2,926 mm/año (IMN, 2020) es favorable para sistemas de captación pluvial.
3. Análisis económico preliminar: Los costos actuales del agua potable en Costa Rica (USD 1.2-2.0/m³) según AyA (2022) justifican inversiones en sistemas de reutilización.
4. Experiencias locales limitadas: Los estudios de Herrera y Chinchilla (2019) en edificaciones residenciales sugieren potenciales del 35% de ahorro.

1.5.3 Modelo Conceptual de la Investigación

Figura 1

Modelo conceptual de la investigación



Fuente: Elaboración propia (2025)

1.5.4 Estrategia de Verificación de Hipótesis

La verificación de las hipótesis se realizará mediante:

1. Análisis estadístico descriptivo para caracterizar las variables
2. Pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) para seleccionar pruebas paramétricas o no paramétricas
3. Análisis de varianza (ANOVA) para comparar consumos entre tipologías
4. Análisis de regresión múltiple para modelar la relación entre variables independientes y dependientes
5. Pruebas t de Student o Mann-Whitney para comparar medias según distribución de datos
6. Análisis de correlación (Pearson o Spearman) entre variables climáticas y eficiencia de captación

Capítulo 2: Marco Teórico

El presente capítulo desarrolla la fundamentación teórica necesaria para abordar la optimización del uso de agua en obras civiles mediante sistemas de captación y reutilización. Se examina el estado actual del conocimiento sobre sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales y grises en el contexto constructivo, así como las experiencias internacionales y nacionales en la implementación de estas tecnologías. Además, se analiza el marco normativo costarricense que regula el uso y reutilización de recursos hídricos, estableciendo las bases conceptuales para la propuesta de optimización hídrica en proyectos de construcción.

2.1 Estado del conocimiento

2.1.1 Fundamentos teóricos de la gestión hídrica en construcción

La gestión eficiente del agua en obras civiles se fundamenta en principios de sostenibilidad ambiental y economía circular. Un sistema de recolección de agua de lluvia consiste en un conjunto de mecanismos que incluyen canaletas, tubos, filtros, tanques, bombas, entre otros, para captar, conducir, almacenar, tratar y utilizar este recurso, tanto para usos potables (consumo y contacto humano) como no potables. Esta definición conceptual establece las bases técnicas para comprender la complejidad de los sistemas de aprovechamiento hídrico en el sector construcción.

Los sistemas de captación pluvial se clasifican según su capacidad de almacenamiento y tratamiento. Un sistema de captación de agua pluvial es una instalación para la recogida del agua de lluvia y su posterior reutilización. Si bien el agua de lluvia no es potable, con el adecuado tratamiento y filtrado de sedimentos sólidos, puede ser fácilmente utilizada para minimizar la huella hídrica. Esta perspectiva técnica resalta la importancia del tratamiento adecuado para garantizar la calidad del agua reutilizada.

La eficiencia de estos sistemas depende de múltiples variables climáticas y constructivas. El coeficiente de escorrentía, definido como la relación entre el volumen de agua captado y el volumen de

precipitación sobre una superficie, varía típicamente entre 0.7 y 0.9 para superficies de captación en obras civiles, siendo mayor en superficies metálicas y concreto que en superficies permeables.

2.1.2 Sistemas de captación de agua lluvia en obras civiles

Los sistemas de captación de agua lluvia en construcción han evolucionado significativamente en las últimas décadas, integrando tecnologías avanzadas de filtración y almacenamiento. La reutilización del agua de lluvia y la implementación de un Sistema de captación de agua de lluvias en proyectos de ingeniería civil requiere un enfoque planificado y bien estructurado. Esta planificación estratégica resulta fundamental para maximizar la eficiencia del sistema y garantizar su viabilidad económica.

La capacidad de captación se calcula mediante la ecuación fundamental:

$$Q = P * A * C * \eta$$

Donde:

Q = Volumen de agua captado (L)

P = Precipitación (mm)

A = Área de captación (m^2)

C = Coeficiente de escorrentía (adimensional)

η = Eficiencia del sistema de captación (%)

Los componentes básicos de un sistema de captación incluyen: área de captación (techos, cubiertas temporales), sistema de conducción (canaletas, bajantes), sistema de filtración primaria, tanques de almacenamiento, y sistema de distribución. La selección de cada componente debe considerar factores como la calidad del agua requerida, el volumen de demanda, y las condiciones climáticas locales.

2.1.3 Reutilización de aguas grises en proyectos constructivos

Las aguas grises representan una fuente significativa de ahorro hídrico en obras civiles. El agua gris se presenta como una atractiva oportunidad para aumentar la disponibilidad hídrica, esta es agua residual que excluye las aguas negras, se puede tratar y reutilizar en riego y descarga de inodoros. Esta definición establece claramente el potencial de aprovechamiento de las aguas grises en contextos constructivos.

El tratamiento de aguas grises involucra procesos físicos, químicos y biológicos. Las aguas grises se pueden tratar y reutilizar mediante la eliminación de sólidos en suspensión, filtración y desinfección. Posteriormente pueden utilizarse para otras finalidades como el lavado de vehículos, la descarga de inodoros o el riego (Roth Spain, 2024)[1]. Los procesos de tratamiento típicos incluyen: sedimentación primaria, filtración biológica, desinfección ultravioleta, y almacenamiento en tanques específicos.

Los parámetros de calidad para aguas grises tratadas varían según el uso final. Para riego y control de polvo, los parámetros críticos incluyen: pH (6.5-8.5), turbidez (<10 NTU), sólidos suspendidos totales (<30 mg/L), y coliformes fecales (<1000 UFC/100mL). Para usos en contacto humano indirecto, los estándares son más restrictivos, requiriendo turbidez <5 NTU y ausencia de coliformes fecales.

2.1.4 Experiencias internacionales en optimización hídrica

A nivel internacional, diversos países han implementado programas exitosos de aprovechamiento hídrico en construcción. Del 2019 a 2024 se han invertido 6.2 millones de dólares para la instalación de más de 73 mil Sistemas de Captación de Agua de Lluvia en 11 alcaldías (SEDEMA Ciudad de México, 2024). Este programa gubernamental demuestra la viabilidad económica y técnica de implementar sistemas de captación a gran escala.

[1] Roth Spain. (2024). *Manual técnico de sistemas de tratamiento de aguas grises*. Madrid: Roth Spain.

Los sistemas surgen de la necesidad de dotar de agua y saneamiento a la población rural de México, en donde existen diversas dificultades técnico - económicas mediante formas "tradicionales" (CONAGUA, 2024). La experiencia mexicana evidencia que los sistemas de captación pueden ser especialmente efectivos en contextos donde el acceso al agua potable es limitado o costoso.

Los estudios de eficiencia reportan ahorros significativos en diferentes contextos climáticos. En Brasil, investigaciones han documentado reducciones del 20-60% en el consumo de agua potable mediante sistemas integrados de captación pluvial y reutilización de aguas grises (Ghisi & Ferreira, 2007, 2512–2522). En Australia, los ahorros típicos oscilan entre 35-45% para edificaciones comerciales con sistemas de tratamiento básico.

2.1.5 Marco normativo y regulatorio

El marco normativo internacional presenta enfoques diversos para regular la reutilización del agua. La utilización de aguas regeneradas se ha convertido en un elemento más de la gestión integrada de los recursos hídricos, que brinda una serie de oportunidades y beneficios evidentes tales como: permitir una mejor gestión de los recursos al liberar volúmenes comprometidos de agua de mayor calidad para otros usos (MITECO España, 2024).

En el contexto costarricense, el marco normativo se estructura alrededor de varios instrumentos legales, como la base de datos del Sistema Costarricense de Información Jurídica (SCIJ) de las normas de referencia para Costa Rica, con énfasis en materia de tratamiento y disposición de aguas residuales, según su orden de importancia. Ley 5395 (1973) - Ley General de Salud. Decreto 33601-S-MINAE (2007) - Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales).[2]

[2] Ministerio de Salud & MINAE. (2007). *Decreto Ejecutivo N° 33601-S-MINAE: Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. La Gaceta N° 55, Costa Rica.

La normativa costarricense establece parámetros específicos para la reutilización de aguas tratadas. El Decreto 33601-S-MINAE (2007, p. 18) define los criterios de calidad para agua reutilizada según el uso final: para riego de cultivos alimentarios, el agua debe cumplir con límites estrictos de coliformes fecales (<1000 UFC/100mL), mientras que, para riego de áreas verdes ornamentales, los límites son menos restrictivos (<10000 UFC/100mL). En agua existen normas nacionales, emitidas por ARESEP, MINAE y Ministerio de Salud, para velar por el suministro de agua apta para el consumo humano.

La Ley de Aguas N° 276 establece los principios fundamentales para la gestión de recursos hídricos en Costa Rica, incluyendo disposiciones específicas sobre el aprovechamiento eficiente del agua y la promoción de tecnologías de ahorro hídrico. El marco legal costarricense reconoce según los artículos 4, 47,48 50 y 51 de dicha ley la importancia de la reutilización del agua, como estrategia de conservación, estableciendo procedimientos administrativos para la obtención de permisos de reutilización y criterios técnicos para el diseño de sistemas de tratamiento.

2.1.6 Tecnologías de tratamiento y filtración

Las tecnologías de tratamiento para agua lluvia y aguas grises han evolucionado considerablemente, integrando procesos físicos, químicos y biológicos adaptados a las características específicas de cada tipo de agua. Existen diferentes tecnologías para el reciclaje de las aguas grises: tratamientos físico-químicos (coagulación-floculación, filtraciones), tratamientos biológicos (lodos activos, SBR) o una combinación de los dos (MBR). Generalmente, estos tratamientos se completan con filtros.

Los sistemas de tratamiento físico-químico incluyen procesos de coagulación-floculación utilizando sulfato de aluminio o cloruro férrico como coagulantes primarios (Alansari, 2021, pp. 45-67; Rosenblum et al., 2016, p. 1979). La dosis típica de coagulante varía entre 50-150 mg/L para aguas grises con turbidez inicial de 50-200 NTU (Boussena et al., 2024, pp. 3-5). Los procesos de filtración emplean medios granulares como arena sílica (tamaño efectivo 0.5-1.2 mm), antracita (tamaño efectivo 1.0-2.0 mm),

y carbón activado granular para remoción de compuestos orgánicos y control de olores (Jackson & Letterman, 1980, pp. 8-12; Sher et al., 2021, p. 111302).

Los sistemas biológicos incluyen reactores de lodos activados de aireación extendida, con tiempos de retención hidráulica de 8-24 horas y concentraciones de sólidos suspendidos mezclado de 2000-4000 mg/L (Metcalf & Eddy, 2014, pp. 856-892; Von Sperling, 2007, pp. 178-185). Los sistemas de reactor secuencial por lotes (SBR) operan con ciclos de 6-8 horas, incluyendo fases de llenado, reacción, sedimentación y descarga (Irvine & Ketchum, 1989, pp. 255-263; Ngo et al., 2008, pp. 191-195).

2.1.7 Evaluación económica y viabilidad financiera

La evaluación económica de sistemas de aprovechamiento hídrico en obras civiles requiere considerar múltiples variables de costo y beneficio. Los costos iniciales incluyen equipos de captación, tratamiento, almacenamiento y distribución, mientras que los beneficios se derivan del ahorro en consumo de agua potable y la reducción de costos de disposición de aguas residuales (National Research Council, 2016, pp. 143-145).

Los costos de capital para sistemas de captación pluvial varían típicamente entre $15-30 USD/m³ de capacidad de almacenamiento, dependiendo de la complejidad del sistema y los materiales utilizados (Pitt et al., 2011, citado en National Research Council, 2016, p. 151; Thomas et al., 2014, pp. 122-135). Los sistemas de tratamiento de aguas grises presentan costos de inversión que oscilan entre $200-500 USD por metro cúbico de capacidad de tratamiento diaria, con costos operativos de $0.1-0.3 USD/m³ tratado (Hodgson, 2012, pp. 28-32; Shehabi et al., 2012, pp. 8943-8950).

Tabla 4

Comparación de costos de sistemas de aprovechamiento hídrico

Tipo de sistema	Inversión inicial (USD/m³)	Costo operativo (USD/m³)	Vida útil (años)
Captación pluvial básica	15-25	0.05-0.10	15-20
Captación pluvial avanzada	25-40	0.10-0.15	20-25
Tratamiento aguas grises	200-350	0.15-0.25	15-20
Sistema integrado	300-500	0.20-0.30	20-25

Fuente: Elaboración propia (2025)

El análisis de viabilidad económica requiere considerar variables como el costo actual del agua potable, la tasa de descuento aplicable, y los beneficios ambientales cuantificables. La ecuación fundamental para el cálculo del Valor Presente Neto (VPN) de un sistema de aprovechamiento hídrico es:

$$VPN = -I_0 + \Sigma(t = 1 \text{ to } n)\left[\frac{At - Ct}{(1 + r)^t}\right]$$

Donde:

I_0 = Inversión inicial

At = Ahorros anuales en año t

Ct = Costos operativos en año t

r = Tasa de descuento

n = Vida útil del proyecto

2.1.8 Eficiencia de captación y coeficientes de escorrentía

La eficiencia de captación de agua lluvia depende fundamentalmente del coeficiente de escorrentía, que varía según el tipo de superficie y las condiciones climáticas. Los techos típicamente tienen una eficiencia del 75-95%, por lo que se utiliza un número entre 0.75 y 0.95 en el cálculo. La mayoría de ejemplos utilizan el número 0.85 (Take Care of Texas, 2024, párr. 5).

El Manual de Texas sobre Captación de Agua Lluvia recomienda usar entre 75% y 90%, dependiendo de qué tan eficientemente el sistema de captación de agua lluvia recolecta (U.S. Department of Energy, 2024). Esta variabilidad en la eficiencia se debe a factores como el tipo de material del techo, la pendiente, el diseño del sistema de canaletas, y las condiciones meteorológicas locales.

Tabla 5

Coeficientes de escorrentía para diferentes superficies

Tipo de superficie	**Coeficiente de escorrentía (C)**	**Eficiencia de captación (%)**
Techo metálico	0.85-0.95	85-95
Techo de concreto	0.80-0.90	80-90
Techo de tejas	0.75-0.85	75-85
Lámina asfáltica	0.70-0.80	70-80
Superficie temporal	0.60-0.75	60-75

Fuente: Elaboración propia (2025)

La ecuación fundamental para calcular el volumen de agua captado es:

$$Q = P * A * C * \eta * 0.001$$

Donde:

Q = Volumen de agua captado (m^3)

P = Precipitación (mm)

A = Área de captación (m^2)

C = Coeficiente de escorrentía (adimensional)

η = Eficiencia del sistema (decimal)

0.001 = Factor de conversión

2.1.9 Tratamiento de aguas grises: tecnologías y eficiencias

El tratamiento de aguas grises requiere tecnologías específicas adaptadas a las características físico-químicas y biológicas de este tipo de agua residual. Los sistemas de tratamiento han sido utilizados para reducir el nivel de contaminación en aguas grises antes de su reutilización o disposición final. Son específicos para contaminantes, y cada uno se aplica siguiendo la secuencia convencional de tratamiento de aguas residuales (pretratamiento, primario, secundario y terciario).

Las técnicas de tratamiento biológico son altamente eficientes comparadas con las físicas y químicas. La reutilización de aguas grises in situ es altamente ventajosa y puede impactar positivamente el medio ambiente (ScienceDirect, 2020).

Tabla 6

Eficiencias de remoción por tipo de tratamiento

Parámetro	**Tratamiento físico**	**Tratamiento biológico**	**Tratamiento combinado**
DBO_5 (%)	40-60	85-95	90-98
DQO (%)	50-70	80-90	90-95
SST (%)	80-95	85-95	95-99
Turbidez (%)	85-95	90-95	95-99
Coliformes (log)	1-2	2-3	3-4

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas biológicos más eficientes incluyen reactores de membrana biológica (MBR), lodos activados de aireación extendida, y filtros biológicos aireados. La ecuación de diseño para reactores de lodos activados es:

$$V = \frac{Q * Y * So}{X * \mu * \frac{S}{Ks + S}}$$

Donde:

V = Volumen del reactor (m^3)

Q = Caudal (m^3/d)

Y = Coeficiente de rendimiento

So = DBO_5 inicial (mg/L)

X = Concentración de sólidos (mg/L)

μ = Tasa específica de crecimiento

S = DBO_5 efluente (mg/L)

Ks = Constante de saturación

2.1.10 Calidad del agua reutilizada y estándares de seguridad

La calidad del agua reutilizada debe cumplir con estándares específicos según el uso final previsto. El agua se considera una fuente libre eterna que puede ser adquirida naturalmente. La demanda de agua procesada está creciendo debido al aumento de la población. El uso sostenible del agua podría mantener un balance entre su demanda y oferta (PMC, 2014).

Tabla 7

Estándares de calidad para agua reutilizada según uso final

Parámetro	Riego ornamental	Control de polvo	Lavado vehículos	Sanitarios
pH	6.0-9.0	6.5-8.5	6.0-8.5	6.5-8.5
Turbidez (NTU)	<10	<20	<5	<2
DBO_5 (mg/L)	<30	<50	<20	<10
SST (mg/L)	<30	<50	<20	<10
Coliformes fecales (UFC/100mL)	<1000	<10000	<200	<2.2

Fuente: Elaboración propia

Los métodos de desinfección incluyen cloración, ozonización, y radiación ultravioleta. La dosis de cloro residual requerida varía entre 0.5-2.0 mg/L dependiendo del uso final y el tiempo de contacto disponible.

2.2 Estado de la cuestión

2.2.1 Evolución histórica de la gestión del agua en construcción

Los sistemas de captación y reutilización de agua en el sector constructivo han experimentado una evolución notable en las últimas décadas. La industria de la construcción, reconocida como uno de los sectores con mayor consumo de agua a nivel mundial, ha comenzado a implementar estrategias innovadoras para optimizar el uso de este recurso vital. **Según Miller et al. (2018), en 2012** la producción de concreto fue responsable del 9% de las extracciones industriales globales de agua y del 1.7% de la extracción total mundial de agua (p. 69). Esta estadística subraya la magnitud del impacto hídrico del sector constructivo y la urgencia de implementar medidas de optimización.

La transformación hacia prácticas más sostenibles en el uso del agua en construcción se ha visto acelerada por factores climáticos y regulatorios. Con el cambio climático contribuyendo a eventos climáticos extremos más frecuentes, se espera que las sequías como las experimentadas recientemente se vuelvan más comunes. Esta realidad ha impulsado a la industria a buscar alternativas que permitan reducir la dependencia de fuentes de agua potable tradicionales, especialmente en proyectos de mediana y gran envergadura.

2.2.2 Sistemas de captación de agua de lluvia en el contexto constructivo

Los sistemas de captación de aguade de lluvia han emergido como una solución práctica y económicamente viable para reducir el consumo de agua potable en obras civiles. La captación de agua lluvia captura, desvía y almacena agua de lluvia de techos para uso posterior, con aplicaciones típicas que

incluyen irrigación de paisajes, aplicaciones de lavado, llenado de estanques ornamentales y fuentes, agua de reposición para torres de enfriamiento, y descarga de inodoros y urinarios.

La implementación de estos sistemas en proyectos constructivos ha demostrado beneficios significativos en términos de reducción del consumo de agua municipal. Un edificio puede reducir su dependencia de sistemas de agua públicos/municipales capturando agua de lluvia, utilizando un sistema de captación que típicamente involucra un sistema de recolección de techos y/o tanques de almacenamiento subterráneo. Esta estrategia resulta particularmente relevante en el contexto costarricense, donde las precipitaciones anuales proporcionan un potencial significativo para la captación pluvial.

2.2.3 Reutilización de aguas grises en obras civiles

La reutilización de aguas grises ha ganado reconocimiento como una estrategia fundamental para la gestión sostenible del agua en el sector constructivo. Uno de los parámetros clave en la gestión sostenible de recursos hídricos urbanos y construcción verde es el tratamiento y reutilización del agua. Se han realizado esfuerzos para mejorar la eficiencia del agua en edificios residenciales y comerciales mediante la reutilización de aguas grises.

La aplicación de estos sistemas en proyectos constructivos presenta ventajas operacionales y ambientales considerables. El reciclaje de aguas grises, proceso en el cual el agua ligeramente contaminada de duchas, bañeras y lavabos es tratada y reutilizada principalmente para descarga de inodoros e irrigación, ofrece oportunidades significativas para la optimización del uso de agua en obras civiles.

2.2.4 Tecnologías emergentes en conservación de agua para construcción

El desarrollo de tecnologías innovadoras para la conservación de agua en sitios de construcción ha expandido las opciones disponibles para optimizar el uso de este recurso. La incorporación de dispositivos de plomería de bajo flujo es una estrategia directa pero impactante para la conservación de agua en

construcción fuera del sitio. Estos dispositivos, incluyendo inodoros, grifos y cabezales de ducha de bajo flujo, están diseñados para usar significativamente menos agua sin comprometer la funcionalidad.

Las estrategias modernas de conservación incluyen el uso de sistemas de tratamiento portátiles y tecnologías de reciclaje in situ. El uso de unidades portátiles de tratamiento de agua para tratar y reutilizar agua en el sitio para diversos propósitos. Los sitios también pueden construir estanques de sedimentación para tratar y reciclar el agua utilizada en procesos de construcción. Estas tecnologías permiten a los proyectos constructivos implementar sistemas de gestión de agua más eficientes y autosuficientes.

2.2.5 Desafíos y oportunidades en la implementación de sistemas de reutilización

La implementación de sistemas de captación y reutilización de agua en obras civiles enfrenta diversos desafíos que requieren consideración cuidadosa. Las tecnologías y estrategias de conservación de agua son a menudo los aspectos más pasados por alto de una estrategia de diseño integral de edificios. Sin embargo, la planificación para varios usos del agua dentro de un edificio se está convirtiendo cada vez más en una alta prioridad.

Los factores que impulsan esta creciente prioridad incluyen la escalada en los costos del agua y la escasez de recursos. Esto se debe a varias razones, principalmente que los recursos hídricos nuevos y existentes se están volviendo cada vez más escasos en varias regiones; el consumo per cápita de agua está aumentando anualmente; las tarifas de agua y alcantarillado han aumentado dramáticamente en la última década (100-400%); y las nuevas opciones de suministro de agua son demasiado costosas o completamente no disponibles (Banco Mundial, 2023).

2.2.6 Impacto ambiental y sostenibilidad en la gestión hídrica constructiva

El impacto ambiental de las prácticas de gestión del agua en construcción ha adquirido relevancia crítica en el contexto de la sostenibilidad ambiental. Los proyectos de construcción pueden apoyar la

reducción del escurrimiento de aguas pluviales usando soluciones de infraestructura verde como pavimentos permeables, techos verdes y jardines de lluvia, reduciendo así la carga en los sistemas de agua urbanos y mejorando la calidad del agua en cuerpos de agua locales.

La industria de la construcción ha reconocido la necesidad de implementar estrategias comprensivas de gestión hídrica que aborden tanto el consumo como el impacto ambiental. Las iniciativas de conservación de agua típicamente comienzan con un ejercicio de línea base para determinar cuánta agua se está utilizando en toda la organización empresarial. La medición del agua puede proporcionar ese punto de referencia midiendo el uso de agua en todos los sitios operativos para todos los usos.

2.2.7 Análisis económico y viabilidad de sistemas de reutilización

La viabilidad económica de los sistemas de captación y reutilización de agua en obras civiles constituye un factor determinante para su adopción generalizada. Los análisis económicos disponibles en la literatura demuestran que estos sistemas pueden generar ahorros significativos a largo plazo, especialmente en regiones con alta precipitación y costos crecientes del agua potable.

El concepto de reciclaje y reutilización de aguas grises se ha convertido gradualmente en una de las estrategias más importantes en países con estrés hídrico. Debido a la alta densidad poblacional y la distribución irregular de lluvias, la distribución promedio anual de precipitación per cápita en Taiwán es un quinto del promedio global, lo que hace de Taiwán un país con serio estrés hídrico. Esta situación proporciona un contexto relevante para comprender la importancia económica de los sistemas de reutilización en regiones con limitaciones hídricas (Chen et al., 2018, p. 1).

2.3 Marco Legal

2.3.1 Normativa Fundamental de Recursos Hídricos

La base legal para la gestión del agua en Costa Rica se sustenta en la Ley de Agua No. 276 publicada en el periódico oficial La Gaceta el 26 de agosto de 1942, la cual establece las funciones y competencias institucionales para la administración del recurso hídrico nacional. Esta ley constituye el marco normativo primario que otorga concesiones y regula el uso individual y corporativo de los recursos hídricos; establece el uso doméstico como una prioridad en la distribución del agua a nivel nacional.

El desarrollo de la normativa hídrica costarricense ha evolucionado hacia enfoques más integrales, donde el marco institucional necesario para la gestión integrada del recurso hídrico con el objetivo de revertir la falta de planificación, la dispersión, la fragmentación y el desorden institucional se ha convertido en una prioridad nacional. Esta evolución responde a la necesidad de modernizar la gestión del agua en el contexto de crecimiento urbano y desarrollo industrial del país.

La gestión integrada del recurso hídrico se fundamenta en principios internacionales, donde el aprovechamiento y la gestión del agua debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles. Este enfoque participativo resulta fundamental para la implementación exitosa de sistemas de reutilización en obras civiles, ya que requiere la coordinación entre múltiples actores del sector construcción.

2.3.2 Regulación del Vertido y Reúso de Aguas Residuales

Esta normativa reciente, contenida en el Decreto 44843-MINAET-MIVAH de 2022, oficialmente llamado Reglamento para la gestión de los residuos de la construcción y de la demolición de obras, es una normativa que regula la gestión integral de los residuos generados en construcciones, remodelaciones y demoliciones en Costa Rica. Aunque se enfoca primordialmente en la gestión de residuos sólidos, esta

regulación establece principios de sostenibilidad ambiental que son aplicables a la gestión del agua en obras civiles (Decreto 44843-MINAET-MIVAH, 2022, art. 1).

Este reglamento resulta particularmente relevante para las obras civiles, ya que define las condiciones bajo las cuales las aguas tratadas pueden ser reutilizadas para diferentes propósitos, incluyendo actividades constructivas como el control de polvo, compactación de suelos y otras aplicaciones que no requieren calidad potable. La normativa establece criterios específicos de calidad del agua tratada según su uso final, lo que permite optimizar el consumo de agua potable en proyectos de construcción.

2.3.3 Normativa del Sector Construcción

El sector de la construcción en Costa Rica está regulado por diversas normativas que inciden directamente en el uso del agua durante las actividades constructivas. Con el objetivo de reducir el impacto ambiental, proteger la salud pública y promover la sostenibilidad, se publicó el reglamento que regula la gestión de residuos generados por actividades de construcción, ampliación, remodelación y demolición en Costa Rica.

Esta normativa reciente, contenida en el Decreto 44843 de 2025, oficialmente llamado Reglamento para la gestión de los residuos de la construcción y de la demolición de obras, es una normativa que regula la gestión integral de los residuos generados en construcciones, remodelaciones y demoliciones en Costa Rica. Aunque se enfoca primordialmente en la gestión de residuos sólidos, esta regulación establece principios de sostenibilidad ambiental que son aplicables a la gestión del agua en obras civiles.

El Reglamento de Construcciones, administrado por el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU), establece los lineamientos técnicos para el desarrollo de proyectos constructivos, incluyendo aspectos relacionados con las instalaciones hidráulicas y sanitarias. Esta normativa debe considerarse en el diseño de sistemas de captación y reutilización de agua, ya que define los estándares mínimos de calidad e instalación que deben cumplirse en las edificaciones (INVU, 2022, p. 97).

2.3.4 Normativa ambiental y permisos

La implementación de sistemas de captación y reutilización de agua en obras civiles debe cumplir con la normativa ambiental vigente, particularmente en lo relacionado con la evaluación de impacto ambiental y los permisos de funcionamiento. Decreto 39887-S-MINAE (2016)- Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales establece los procedimientos y requisitos técnicos para la aprobación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Esta normativa es especialmente relevante para proyectos de gran envergadura que requieren sistemas de tratamiento más complejos, ya que establece los criterios técnicos y ambientales que deben cumplir estos sistemas para obtener los permisos correspondientes. La regulación incluye aspectos como la capacidad de tratamiento, eficiencia de remoción de contaminantes y protocolos de monitoreo y control.

2.3.5 Instrumentos regulatorios para la sostenibilidad hídrica

La Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) ha desarrollado instrumentos regulatorios específicos para promover el uso eficiente del agua en diferentes sectores. Estos instrumentos incluyen tarifas diferenciadas que incentivan el ahorro de agua y penalizan el consumo excesivo, lo que genera incentivos económicos para la implementación de sistemas de reutilización en obras civiles.

La política regulatoria actual reconoce la importancia de la eficiencia hídrica como elemento fundamental para la sostenibilidad del sector construcción. Esta orientación normativa proporciona un marco favorable para el desarrollo de tecnologías y sistemas que optimicen el uso del agua en actividades constructivas, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible del país.

2.3.6 Desafíos y oportunidades normativas

A pesar del marco normativo existente, persisten desafíos en la implementación práctica de sistemas de reutilización de agua en obras civiles. La fragmentación institucional y la falta de coordinación

entre diferentes entidades regulatorias pueden generar incertidumbres en los procesos de aprobación y supervisión de estos sistemas.

Sin embargo, las tendencias normativas actuales apuntan hacia una mayor integración de criterios de sostenibilidad en la regulación del sector construcción. Esta evolución normativa crea oportunidades para el desarrollo de marcos regulatorios más específicos que faciliten la implementación de sistemas de captación y reutilización de agua en obras civiles, promoviendo la innovación tecnológica y la eficiencia hídrica en el sector.

La convergencia entre las normativas ambientales, hídricas y de construcción hacia enfoques más integrados y sostenibles proporciona una base sólida para el desarrollo de políticas públicas que incentiven la optimización del uso del agua en obras civiles costarricenses. Esta evolución normativa debe considerarse como una oportunidad para posicionar al sector construcción nacional como líder en prácticas sostenibles de gestión del agua a nivel centroamericano.

Capítulo 3: Metodología

El presente capítulo describe el diseño metodológico implementado para alcanzar los objetivos de investigación planteados. Se expone la naturaleza del estudio, las fuentes de información, los procedimientos de recolección y análisis de datos, así como las consideraciones éticas y limitaciones metodológicas que enmarcan esta investigación sobre optimización del uso de agua en obras civiles costarricenses.

3.1 Tipo de Investigación

3.1.1 Naturaleza de la investigación: Cualitativa, cuantitativa o mixta

Esta investigación adopta un enfoque mixto secuencial explicativo, combinando elementos cuantitativos y cualitativos de manera complementaria. La selección de este diseño metodológico responde a la complejidad del fenómeno estudiado, que requiere tanto la cuantificación precisa de variables hídricas como la comprensión profunda de los factores contextuales que influyen en la implementación de sistemas de reutilización.

Tabla 8

Componentes de la naturaleza de la investigación.

COMPONENTE	TÉCNICAS / MÉTODOS	DESCRIPCIÓN
Cuantitativo (Predominante)	Medición de consumos de agua	Cuantificación del uso de agua potable en obras civiles mediante levantamientos directos y análisis de registros de consumo.
	Modelación hidrológica	Cálculo del potencial de captación de agua lluvia basado en datos de precipitación histórica y áreas de captación disponibles.
	Análisis estadístico multivariable	Construcción de modelos de regresión múltiple para identificar factores predictores de la eficiencia de sistemas de reutilización.

	Evaluación económica	Análisis costo-beneficio mediante indicadores financieros (VPN, TIR, período de recuperación).
Cualitativo (Complementario)	Entrevistas semiestructuradas	Conversaciones con ingenieros residentes, maestros de obra y responsables de proyectos para comprender prácticas actuales y barreras de implementación.
	Observación de campo	Documentación de procedimientos constructivos relacionados con el uso del agua.
	Análisis documental	Revisión de especificaciones técnicas, bitácoras de obra y documentos normativos.

La integración de ambos enfoques permite una comprensión holística del fenómeno, donde los datos cuantitativos proporcionan evidencia medible del potencial de ahorro hídrico, mientras que los datos cualitativos explican los contextos, limitaciones y oportunidades para la implementación práctica de estos sistemas.

3.1.2 Carácter de la investigación: descriptivo, explicativo, inferencial

La investigación presenta un carácter explicativo-correlacional con alcance inferencial, estructurado en tres dimensiones analíticas progresivas:

Dimensión descriptiva

En su primera capa analítica, la investigación caracteriza:

- Patrones de consumo de agua en obras civiles de diferentes tipologías (residencial, comercial, industrial).
- Distribución temporal del consumo durante las fases constructivas.
- Características de los sistemas de abastecimiento hídrico actualmente utilizados.
- Condiciones climáticas regionales relevantes para la captación pluvial.

Esta dimensión establece la línea base necesaria para análisis posteriores, documentando la situación actual del uso del agua en el sector construcción costarricense.

Dimensión explicativa

La investigación avanza hacia la explicación de relaciones causales:

- ¿Cómo influyen las variables climáticas (precipitación, estacionalidad) en la eficiencia de captación?
- ¿Qué factores del proyecto (tamaño, duración, tipología) determinan el potencial de ahorro hídrico?
- ¿Por qué algunos tipos de obras presentan mayor viabilidad para implementar sistemas de reutilización?

Esta dimensión busca identificar y cuantificar las relaciones causa-efecto entre variables independientes y la eficiencia del sistema de reutilización.

Dimensión inferencial

Finalmente, la investigación desarrolla capacidad predictiva mediante:

- Modelos estadísticos que permiten estimar la reducción potencial de consumo de agua potable en función de características del proyecto.
- Extrapolación de resultados desde la muestra analizada hacia la población de obras civiles costarricenses.
- Generalización de hallazgos para contextos con características climáticas y constructivas similares.

Esta estructura metodológica multinivel permite no solo describir la situación actual, sino también explicar los mecanismos subyacentes y generar predicciones aplicables a futuros proyectos constructivos.

3.1.3 Validación metodológica (en 3 fases)

Para garantizar la robustez y confiabilidad de los resultados, se implementa un proceso de validación metodológica estructurado en tres fases secuenciales:

Tabla 9

Cronograma de validación metodológica

Fase	Periodo	Actividad	Descripción
Fase 1: Validación de Instrumentos	Semanas 1-4	Validación de contenido	Revisión de cuestionarios y fichas técnicas por tres expertos en ingeniería hidráulica y construcción.
		Prueba piloto	Aplicación de instrumentos en 5 proyectos de construcción para identificar ambigüedades y problemas.
		Ajuste de instrumentos	Refinamiento de formularios, escalas y protocolos según retroalimentación.
Fase 2: Validación de Datos	Semanas 5-20	Triangulación de fuentes	Verificación cruzada con facturas de agua, mediciones directas y estimaciones de ingenieros residentes.
		Verificación de consistencia	Análisis estadístico de coherencia (outliers, pruebas de normalidad).
		Auditoría de registros	Revisión aleatoria del 20% de los registros para verificar precisión y completitud.
3: Validación de Resultados	Semanas 21-24	Validación estadística	Verificación de supuestos de modelos de regresión (normalidad, homocedasticidad, independencia, multicolinealidad).
		Validación cruzada	División de la muestra en 70% entrenamiento y 30% validación para evaluar capacidad predictiva.
		Validación con expertos	Presentación de resultados preliminares a 5 especialistas para revisión técnica y económica.

3.2 Sujetos y fuentes de información

3.2.1 Sujetos de información

Los sujetos de información constituyen las personas y entidades que proporcionan datos primarios relevantes para la investigación. Dada la naturaleza del estudio, se identifican cuatro categorías principales de sujetos:

Categoría 1: Profesionales en obras de construcción (n=12)

- Ingenieros residentes (n=5). Profesionales con al menos 3 años de experiencia en dirección de obras civiles medianas o grandes. Proporcionan información sobre consumos típicos, prácticas actuales y viabilidad técnica de sistemas de reutilización.
- Maestros de obra (n=4). Encargados operativos con conocimiento directo de procedimientos constructivos que involucran uso intensivo de agua.
- Encargados de seguridad ocupacional (n=3). Responsables de monitorear el cumplimiento de normativas ambientales y de salud en obra.

Criterios de selección:

- Experiencia mínima de 3 años en proyectos de construcción en Costa Rica
- Participación activa en proyectos durante el período 2023-2025
- Disposición para compartir información técnica y económica
- Proyectos ubicados en las regiones de estudio (Valle Central y Pacífico Central)

Categoría 2: Desarrolladores y Gestores de Proyectos (n=8)

- Desarrolladores inmobiliarios (n=4), tomadores de decisión sobre inversiones en tecnologías de construcción sostenible.
- Gerentes de proyectos (n=4), responsables de planificación y presupuesto de obras civiles.

Estos sujetos aportan perspectivas sobre viabilidad económica, disposición al cambio tecnológico y restricciones presupuestarias.

Categoría 3: Expertos en Gestión Hídrica (n=5)

- Especialistas en hidrología (n=2). Profesionales con conocimiento en sistemas de captación pluvial y tratamiento de aguas.
- Consultores ambientales (n=2). Expertos en evaluación de impacto ambiental y sostenibilidad constructiva.
- Funcionarios reguladores (n=1). Representante de entidades como MINAE, AyA o Ministerio de Salud con conocimiento del marco normativo vigente.

Categoría 4: Proveedores de Tecnología (n=3)

Empresas que comercializan sistemas de captación, almacenamiento y tratamiento de agua, proporcionando información técnica y económica sobre equipos disponibles en el mercado costarricense.

Tabla 10

Distribución de sujetos de información por categoría

Categoría	Subcategoría	Cantidad	Tipo de información proporcionada
Profesionales en obra	Ingenieros residentes	5	Consumos, prácticas, viabilidad técnica
	Maestros de obra	4	Procedimientos operativos, uso diario
	Seg. ocupacional	3	Normativa, cumplimiento ambiental
Desarrolladores	Desarrolladores	4	Viabilidad económica, inversión
	Gerentes proyecto	4	Planificación, presupuestos
Expertos hídricos	Hidrólogos	2	Diseño de sistemas, eficiencias
	Consultores ambientales	2	Sostenibilidad, impacto ambiental
	Funcionarios	1	Marco regulatorio, permisos
Proveedores	Empresas tecnología	3	Equipos, costos, especificaciones

Total		**28**	

Fuente. Elaboración propia (2025)

3.2.2 Fuentes de información

Las fuentes de información se clasifican en primarias y secundarias, cada una aportando datos específicos necesarios para responder a los objetivos de investigación.

Fuentes Primarias

1. Levantamientos de campo en obras de construcción (n=35 proyectos)
    a. Mediciones directas de consumo de agua mediante lectura de medidores
    b. Registro fotográfico de instalaciones hidráulicas temporales
    c. Observación de prácticas de uso de agua en diferentes actividades constructivas
    d. Levantamiento de áreas de captación potencial (techos temporales, estructuras)
2. Entrevistas semiestructuradas (n=28 entrevistas)
    a. Duración promedio: 45-60 minutos
    b. Grabación con consentimiento informado
    c. Transcripción literal para análisis cualitativo
3. Facturas y registros de consumo
    a. Facturas mensuales de agua de proyectos durante 6-18 meses
    b. Registros internos de abastecimiento mediante cisternas
    c. Bitácoras de obra relacionadas con actividades de alto consumo hídrico
4. Cuestionarios estructurados (n=35 proyectos)
    a. Ficha técnica del proyecto (área, duración, tipología, número de trabajadores)
    b. Inventario de usos del agua (concreto, curado, control de polvo, sanitarios, etc.)
    c. Estimación de demanda de agua no potable

Fuentes Secundarias

1. Datos climáticos históricos
    a. Instituto Meteorológico Nacional (IMN): Precipitación mensual 2005-2024 para estaciones en Valle Central y Pacífico Central
    b. Temperatura, humedad relativa, evapotranspiración
2. Normativa y regulaciones
    a. Ley de Aguas N° 276
    b. Decreto 33601-S-MINAE (Vertido y Reuso)
    c. Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias (CIHSE)
    d. Reglamentos municipales de construcción
3. Tarifas y costos
    a. Tarifas oficiales de AyA por región
    b. Costos de equipos de captación y tratamiento (cotizaciones de proveedores)
    c. Costos de construcción (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos - CFIA)
4. Literatura científica y técnica
    a. Artículos de revistas indexadas sobre sistemas de reutilización
    b. Estudios de caso internacionales
    c. Manuales técnicos de diseño de sistemas de captación
5. Bases de datos institucionales
    a. Registro de permisos de construcción (municipalidades)
    b. Estadísticas del sector construcción (Cámara Costarricense de la Construcción)

3.2.3 Procedimiento de recolección

El procedimiento de recolección de datos se estructura en cuatro etapas temporales claramente diferenciadas:

Etapa 1: Preparación y Acercamiento (Mes 1)

- Identificación de proyectos potenciales mediante contactos con Cámara de Construcción y municipalidades
- Solicitud formal de acceso a proyectos.
- Firma de acuerdos de confidencialidad con desarrolladores cuando sea requerido
- Preparación de instrumentos y materiales de campo (cuestionarios, formatos, equipos de medición)

Etapa 2: Recolección Intensiva (Meses 2-6)

- Visitas semanales a proyectos en ejecución (2-3 proyectos por semana)
- Registro fotográfico y mediciones in situ
- Aplicación de cuestionarios a ingenieros residentes
- Recolección de facturas y documentación técnica

Etapa 3: Entrevistas en Profundidad (Meses 4-7)

- Realización de entrevistas semiestructuradas (distribuidas a lo largo de 4 meses)
- Transcripción y codificación preliminar de entrevistas
- Saturación teórica como criterio de suficiencia de información cualitativa
- Etapa 4: Consolidación y Verificación (Meses 7-8)
- Revisión de completitud de datos recolectados
- Verificación cruzada con fuentes alternativas cuando existan inconsistencias
- Solicitud de información complementaria mediante llamadas telefónicas o correos electrónicos

3.3 Muestra y Población

3.3.1 Tipo de muestra

La investigación utiliza un diseño de muestreo no probabilístico por conveniencia estratificado, justificado por las características específicas del estudio y las limitaciones prácticas de acceso a información en obras de construcción. Aunque este tipo de muestreo no permite generalizaciones estadísticas estrictas a toda la población, sí permite identificar patrones, estimar relaciones entre variables y generar hipótesis verificables en estudios posteriores.

Justificación del tipo de muestreo:

1. Dificultad de acceso, las obras de construcción son entornos restringidos donde el acceso depende de autorizaciones de desarrolladores y constructores. Un muestreo aleatorio requeriría un marco muestral completo (listado de todas las obras activas) que no existe de manera centralizada en Costa Rica.
2. Variabilidad temporal, los proyectos constructivos tienen duraciones finitas, lo que dificulta la planificación de un muestreo probabilístico riguroso.
3. Recursos limitados, la investigación es realizada por un solo investigador, lo que limita la capacidad de recolección simultánea de datos en múltiples sitios.

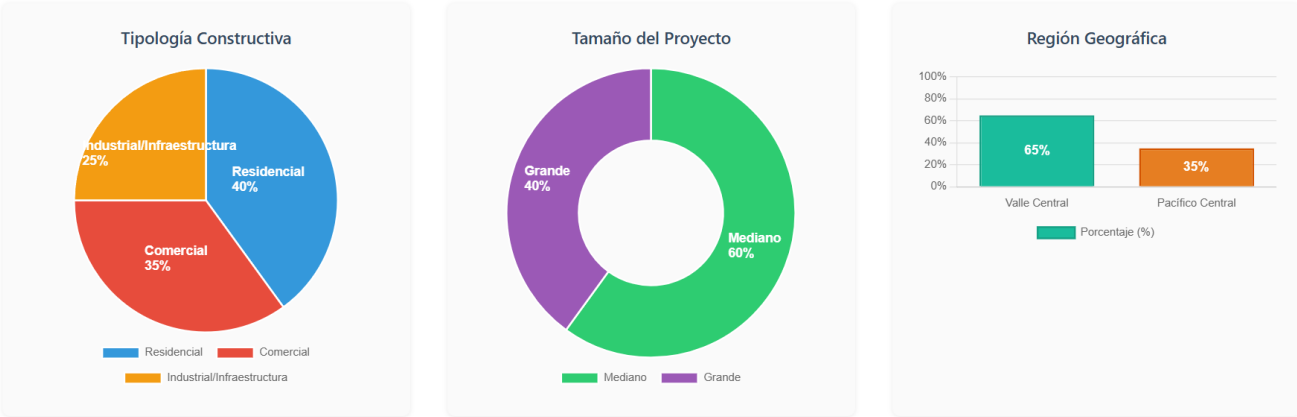
Estratificación de la muestra:

Para garantizar representatividad cualitativa, se estratifica la muestra según tres criterios clave:

1. Tipología constructiva: Residencial (40%), Comercial (35%), Industrial/Infraestructura (25%)
2. Tamaño del proyecto: Mediano (60%), Grande (40%)
3. Región geográfica: Valle Central (65%), Pacífico Central (35%)

Figura 2

Distribución de la muestra por estratos (Tipología, Tamaño y Región).



Fuente. Elaboración propia (2025)

Esta estratificación asegura que la muestra capture la diversidad de contextos constructivos relevantes para los objetivos de investigación.

3.3.2 Descripción de la muestra

La muestra final está constituida por 35 proyectos de construcción activos durante el período de mayo 2025 - agosto 2025 en las regiones del Valle Central y Pacífico Central de Costa Rica. La selección se realizó mediante contacto directo con desarrolladores, constructoras y mediante referencias de profesionales del sector.

Criterios de inclusión:

1. Proyectos clasificados como medianos o grandes según definiciones de la sección 1.4.3
2. Duración mínima proyectada de 6 meses al momento del primer levantamiento
3. Ubicación en Valle Central (provincias de San José, Alajuela, Heredia, Cartago) o Pacífico Central (Puntarenas)

4. Disposición del desarrollador/constructor para facilitar acceso y información
5. Fase constructiva: desde cimentación hasta acabados (excluye proyectos en etapa de excavación únicamente)

Criterios de exclusión:

1. Proyectos con menos de 10 trabajadores promedio
2. Obras de mantenimiento o remodelaciones menores
3. Proyectos gubernamentales con restricciones de acceso a información
4. Obras con sistemas de reutilización ya implementados (para evitar sesgo en la línea base)

Tabla 11

Composición de la muestra por estratos

ESTRATO	CARACTERÍSTICA	PROYECTOS (N)	PORCENTAJE (%)	JUSTIFICACIÓN
Tipología	Residencial multifamiliar	14	40%	Mayor volumen construcción urbana
	Comercial/oficinas	12	34%	Crecimiento sector servicios
	Industrial/infraestructura	9	26%	Representación sectorial
Tamaño	Mediano (500-2000 m²)	21	60%	Más frecuentes en mercado
	Grande (>2000 m²)	14	40%	Mayor impacto hídrico unitario
Región	Valle Central	23	66%	Concentración demográfica
	Pacífico Central	12	34%	Variabilidad climática
Total		**35**	**100%**	

Fuente. Elaboración propia (2025)

Distribución geográfica:

Valle Central (n=23):

- San José: 10 proyectos
- Alajuela: 5 proyectos
- Heredia: 5 proyectos
- Cartago: 3 proyectos

Pacífico Central (n=12):

- Puntarenas (cantón central): 6 proyectos
- Garabito (Jacó): 4 proyectos
- Montes de Oro: 2 proyectos

3.3.3 Descripción estadística de la población

La población objetivo de esta investigación se define como el conjunto de obras civiles medianas y grandes ejecutadas en Costa Rica durante el año 2025, con las características especificadas en la sección 1.4.3 (Alcance Técnico).

Estimación del tamaño poblacional:

Según datos de la Cámara Costarricense de la Construcción (CCC) y registros municipales, se estima que durante el período de referencia se ejecutaron aproximadamente:

1. Valle Central: 180-220 proyectos medianos-grandes por año, 1,000 proyectos en 5 años
2. Pacífico Central: 60-80 proyectos medianos-grandes por año, 350 proyectos en 5 años

Población estimada total: N= 1,350 proyectos

Esta estimación considera únicamente proyectos formales con permisos de construcción vigentes, excluyendo construcciones informales o proyectos pequeños fuera del alcance del estudio.

Representatividad de la muestra:

Aunque la muestra (n=35) representa únicamente el 2.6% de la población estimada (N≈1,350), la estratificación intencional y la diversidad de contextos capturados permite inferencias razonables sobre patrones de consumo y viabilidad de sistemas de reutilización. La representatividad cualitativa (diversidad de tipologías, tamaños y regiones) compensa parcialmente la limitación cuantitativa del tamaño muestral.

3.4 Instrumentos y técnicas de recolección

3.4.1 Diseño de instrumentos

Se diseñaron cinco instrumentos específicos de recolección de datos, cada uno dirigido a capturar información diferenciada según los objetivos de investigación:

Instrumento 1: Ficha Técnica de Proyecto (FTP)

Instrumento 1: Ficha Técnica de Proyecto (FTP)

Descripción: Cuestionario estructurado para capturar la información fundamental de cada obra civil incluida en la muestra.

Sección A: Identificación General

Nombre del Proyecto: _____

Ubicación (Provincia, Cantón): _____

Empresa Desarrolladora: _____

Empresa Constructora: _____

Tipología: ☐ Residencial ☐ Comercial ☐ Industrial ☐ Otro: _____

Estado de Avance (al inicio): ____ %

Fecha de Inicio: ____/____/_____

Fecha Estimada de Finalización: ____/____/_____

Sección B: Características Constructivas

Área de Construcción (m²): _____

Número de Niveles: _____

Sistema Constructivo Principal: _____

Materiales Predominantes: _____

Sección C: Recursos Humanos

Número Promedio de Trabajadores: _____

Horario de Trabajo: _____

Número de Turnos: _____

Sección D: Abastecimiento Hídrico

Fuente Principal de Agua: ☐ Red Municipal (AyA) ☐ Cisterna ☐ Pozo ☐ Otro: _____

Sistema de Almacenamiento Temporal: ☐ Sí ☐ No | **Capacidad (m³):** _____

Existencia de Medidor General: ☐ Sí ☐ No

Sección E: Usos del Agua (Estimación inicial)

Principales Actividades Consumidoras:

☐ Producción de concreto
☐ Curado de estructuras
☐ Control de polvo
☐ Limpieza de equipos/vehículos
☐ Sanitarios y consumo humano
☐ Otros: _____

Sección F: Áreas de Captación Potencial

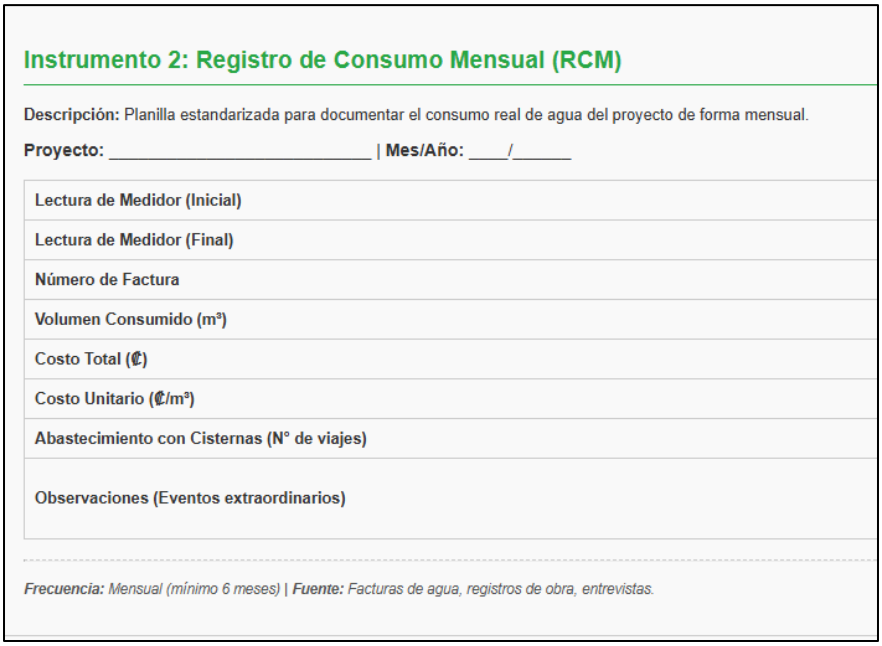
Áreas de Techos Temporales (m²): _____ | **Material:** _____

Áreas de Losas/Estructuras (m²): _____ | **Material:** _____

Tiempo de aplicación: *30-40 minutos* | ***Aplicado a:*** *Ingeniero residente o Maestro de obra* | ***Momento:***

Fuente. Elaboración propia (2025)

Instrumento 2: Registro de Consumo Mensual (RCM)



Instrumento 2: Registro de Consumo Mensual (RCM)

Descripción: Planilla estandarizada para documentar el consumo real de agua del proyecto de forma mensual.

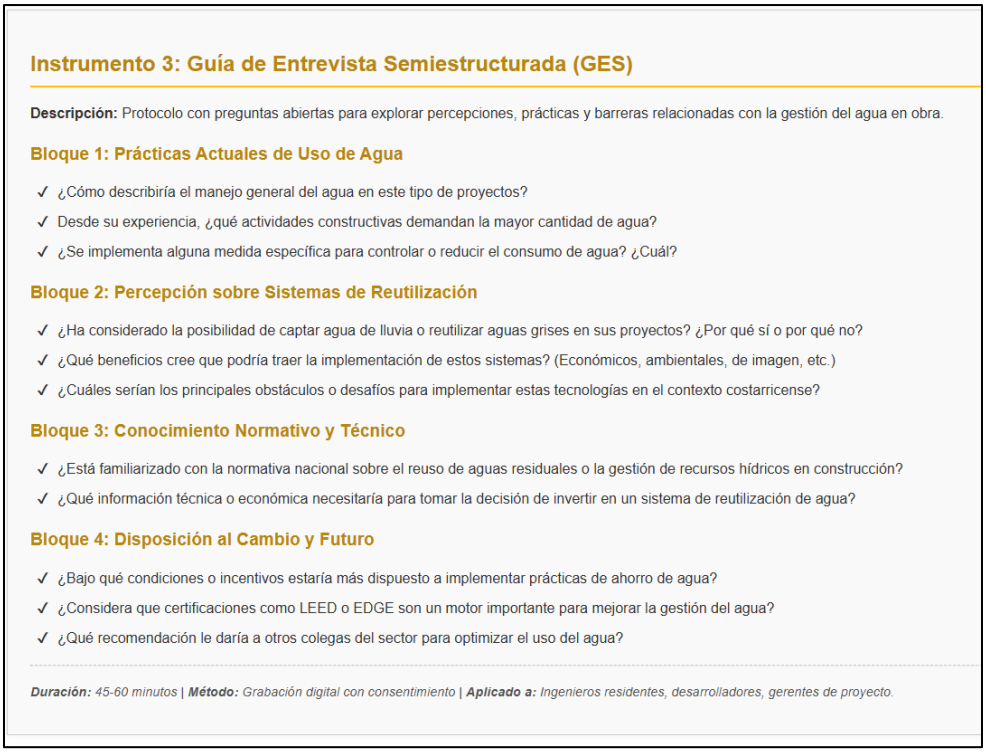
Proyecto: _____ | **Mes/Año:** ____/_____

Lectura de Medidor (Inicial)
Lectura de Medidor (Final)
Número de Factura
Volumen Consumido (m³)
Costo Total (₡)
Costo Unitario (₡/m³)
Abastecimiento con Cisternas (N° de viajes)
Observaciones (Eventos extraordinarios)

Frecuencia: *Mensual (mínimo 6 meses)* | ***Fuente:*** *Facturas de agua, registros de obra, entrevistas.*

Fuente. Elaboración propia (2025)

Instrumento 3: Guía de Entrevista Semiestructurada (GES)



Instrumento 3: Guía de Entrevista Semiestructurada (GES)

Descripción: Protocolo con preguntas abiertas para explorar percepciones, prácticas y barreras relacionadas con la gestión del agua en obra.

Bloque 1: Prácticas Actuales de Uso de Agua

- ✓ ¿Cómo describiría el manejo general del agua en este tipo de proyectos?
- ✓ Desde su experiencia, ¿qué actividades constructivas demandan la mayor cantidad de agua?
- ✓ ¿Se implementa alguna medida específica para controlar o reducir el consumo de agua? ¿Cuál?

Bloque 2: Percepción sobre Sistemas de Reutilización

- ✓ ¿Ha considerado la posibilidad de captar agua de lluvia o reutilizar aguas grises en sus proyectos? ¿Por qué sí o por qué no?
- ✓ ¿Qué beneficios cree que podría traer la implementación de estos sistemas? (Económicos, ambientales, de imagen, etc.)
- ✓ ¿Cuáles serían los principales obstáculos o desafíos para implementar estas tecnologías en el contexto costarricense?

Bloque 3: Conocimiento Normativo y Técnico

- ✓ ¿Está familiarizado con la normativa nacional sobre el reuso de aguas residuales o la gestión de recursos hídricos en construcción?
- ✓ ¿Qué información técnica o económica necesitaría para tomar la decisión de invertir en un sistema de reutilización de agua?

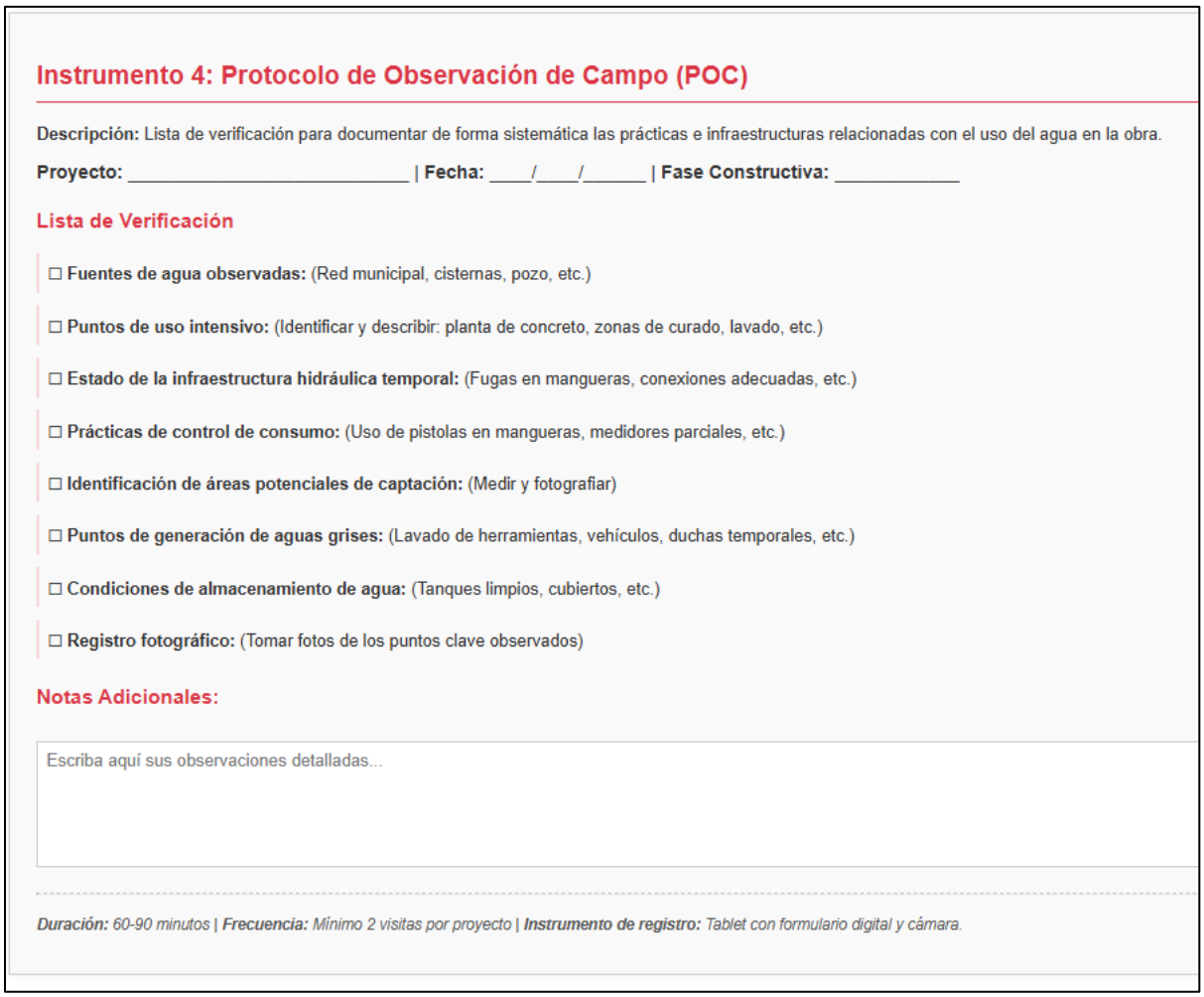
Bloque 4: Disposición al Cambio y Futuro

- ✓ ¿Bajo qué condiciones o incentivos estaría más dispuesto a implementar prácticas de ahorro de agua?
- ✓ ¿Considera que certificaciones como LEED o EDGE son un motor importante para mejorar la gestión del agua?
- ✓ ¿Qué recomendación le daría a otros colegas del sector para optimizar el uso del agua?

Duración: *45-60 minutos* | ***Método:*** *Grabación digital con consentimiento* | ***Aplicado a:*** *Ingenieros residentes, desarrolladores, gerentes de proyecto.*

Fuente. Elaboración propia (2025)

Instrumento 4: Protocolo de Observación de Campo (POC)



Instrumento 4: Protocolo de Observación de Campo (POC)

Descripción: Lista de verificación para documentar de forma sistemática las prácticas e infraestructuras relacionadas con el uso del agua en la obra.

Proyecto: _____ | **Fecha:** ____/____/_____ | **Fase Constructiva:** _____

Lista de Verificación

☐ **Fuentes de agua observadas:** (Red municipal, cisternas, pozo, etc.)

☐ **Puntos de uso intensivo:** (Identificar y describir: planta de concreto, zonas de curado, lavado, etc.)

☐ **Estado de la infraestructura hidráulica temporal:** (Fugas en mangueras, conexiones adecuadas, etc.)

☐ **Prácticas de control de consumo:** (Uso de pistolas en mangueras, medidores parciales, etc.)

☐ **Identificación de áreas potenciales de captación:** (Medir y fotografiar)

☐ **Puntos de generación de aguas grises:** (Lavado de herramientas, vehículos, duchas temporales, etc.)

☐ **Condiciones de almacenamiento de agua:** (Tanques limpios, cubiertos, etc.)

☐ **Registro fotográfico:** (Tomar fotos de los puntos clave observados)

Notas Adicionales:

Escriba aquí sus observaciones detalladas...

Duración: *60-90 minutos* | ***Frecuencia:*** *Mínimo 2 visitas por proyecto* | ***Instrumento de registro:*** *Tablet con formulario digital y cámara.*

Fuente. Elaboración propia (2025)

Instrumento 5: Ficha de datos climáticos y cálculo de potencial (FDCCP)

Instrumento 5: Ficha de Datos Climáticos y Cálculo de Potencial (FDCCP)

Descripción: Hoja de cálculo para integrar datos climáticos y de la obra para estimar el potencial de captación de agua de lluvia.

Datos de Entrada

Estación Meteorológica (IMN): _____

Área de Captación Medida (m²): _____

Tipo de Superficie: _____ | **Coeficiente de Escorrentía (C):** _____

Eficiencia Estimada del Sistema (η): _____ %

Demanda Estimada de Agua No Potable (m³/mes): _____

Resultados del Cálculo

Mes	Precipitación Prom. (mm)	Volumen Capturable (m³)
Enero		
Febrero		
Marzo		
Abril		
Mayo		
Junio		
Julio		
Agosto		
Septiembre		
Octubre		
Noviembre		
Diciembre		
Total Anual		

Fuente de datos climáticos: *Instituto Meteorológico Nacional (IMN)* | ***Procesamiento:*** *Hoja de cálculo (Excel).*

Fuente. Elaboración propia (2025)

3.4.2 Procedimiento de intervención

El procedimiento de intervención se estructura como un protocolo sistemático de siete pasos secuenciales, diseñado para maximizar la calidad y completitud de los datos recolectados mientras se minimiza la interferencia con las actividades normales de la obra.

1. Contacto inicial y autorización

- Identificación del proyecto mediante fuentes secundarias (permisos municipales, contactos profesionales)
- Contacto telefónico o por correo electrónico con desarrollador o constructor
- Presentación formal del proyecto de investigación.
- Solicitud de autorización escrita para acceso a obra y revisión de información
- Firma de acuerdo de confidencialidad (cuando es requerido por el desarrollador)
- Coordinación de fecha y hora para primera visita

Tiempo estimado: 1-2 semanas por proyecto

Tasa de aceptación observada: 45% (78 proyectos contactados, 35 aceptaron participar)

2. Primera visita de reconocimiento

Objetivos:

- Establecer rapport con equipo de obra
- Realizar recorrido general del proyecto
- Aplicar Ficha Técnica de Proyecto (FTP)
- Identificar áreas de captación potencial
- Fotografiar instalaciones hidráulicas relevantes
- Solicitar documentación complementaria (facturas, cronogramas, planos)

Duración: 2-3 horas

Participantes: Investigador e ingeniero residente/Maestro de obra

Materiales: Tablet, cámara, cinta métrica, cuestionario FTP impreso como respaldo

3. Recopilación documental

Período de 1-2 semanas posterior a la primera visita para:

1. Digitalizar facturas de agua de meses anteriores (mínimo 3 meses previos)
2. Obtener planos arquitectónicos para cálculo preciso de áreas
3. Revisar cronograma actualizado de obra
4. Descargar datos climáticos de estación IMN correspondiente

4. Segunda visita - Observación detallada

Objetivos:

- Aplicar Protocolo de Observación de Campo (POC)
- Realizar mediciones precisas de áreas de captación con GPS y odómetro digital
- Documentar prácticas específicas de uso de agua (curado de losas, lavado de equipos, etc.)
- Identificar puntos de generación de aguas grises
- Entrevistar informalmente a trabajadores sobre rutinas hídricas

Duración: 1.5-2 horas

Momento óptimo: Día de alta actividad constructiva (generalmente miércoles o jueves)

5: Monitoreo mensual de consumo

Durante el período de seguimiento (6-18 meses según duración del proyecto):

- Contacto mensual con encargado administrativo (presencial, telefónico o por WhatsApp)
- Registro de consumo mensual mediante Instrumento RCM
- Documentación de eventos extraordinarios (períodos de lluvia intensa, paros, fases de alto consumo)

- Ajuste de estimaciones según avance de obra

Modalidad: Mixta (presencial primeros 3 meses, después remota si hay confianza establecida)

6. Entrevista en profundidad

Se realiza idealmente entre el mes 3-5 de seguimiento, cuando:

- Existe relación de confianza establecida
- El proyecto ha avanzado suficiente para que el entrevistado tenga perspectiva
- Se han identificado patrones de consumo claros

Procedimiento específico:

1. Coordinación previa de cita en momento de baja presión laboral
2. Preparación de guía de entrevista adaptada al contexto del proyecto
3. Grabación con consentimiento informado verbal (registrado en audio)
4. Toma de Fuentes complementarias durante la entrevista
5. Transcripción literal dentro de las 48 horas siguientes
6. Envío de transcripción al entrevistado para validación (opcional)

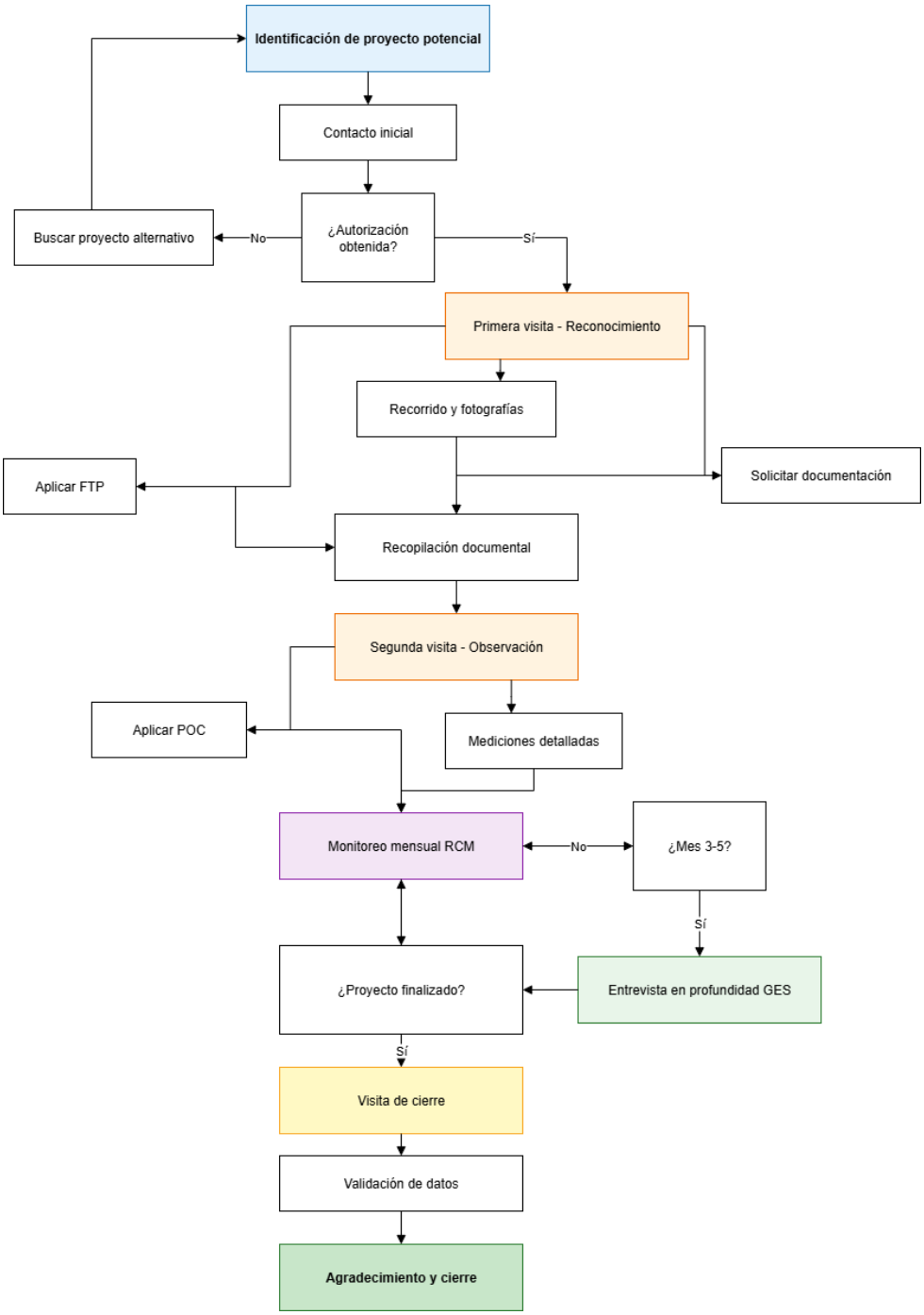
7. Visita de cierre y validación

Al finalizar el período de seguimiento o al concluir el proyecto:

- Visita final para fotografiar obra terminada
- Validación de datos recopilados con ingeniero residente
- Presentación preliminar de hallazgos específicos del proyecto
- Agradecimiento formal y entrega de certificado de participación
- Compromiso de envío de informe final de investigación

Figura 3.

Diagrama de flujo del procedimiento de intervención.



Fuente. Elaboración propia (2025)

3.5 Estrategia de análisis de datos

3.5.1 Presentación y análisis de los datos

La estrategia de análisis integra técnicas cuantitativas y cualitativas en un proceso iterativo de triangulación metodológica. El análisis se estructura en cinco fases progresivas:

Fase 1: Preparación y limpieza de datos

Datos cuantitativos:

- Creación de base de datos en formato digital (Software: Excel y Python)
- Codificación de variables categóricas (tipología: 1=Residencial, 2=Comercial, 3=Industrial; región: 1=Valle Central, 2=Pacífico) en software Python.
- Detección de valores atípicos mediante gráficos de caja (boxplots) y criterio de Tukey (Q1-1.5*IQR, Q3+1.5*IQR) en software Python
- Tratamiento de datos faltantes: imputación por media para variables continuas con <10% de datos perdidos; eliminación de casos con >20% de datos faltantes
- Transformación de variables cuando sea necesario (logaritmos para variables con distribución asimétrica)

Datos cualitativos:

1. Transcripción literal de entrevistas (software: Express Scribe)
2. Anonimización de transcripciones (nombres reemplazados por códigos: E01, E02...)
3. Lectura inicial de transcripciones para familiarización con contenido
4. Identificación preliminar de temas emergentes

Fase 2: Análisis descriptivo

Estadística descriptiva (software: Python):

Para variables continuas:

- Medidas de tendencia central: media, mediana, moda
- Medidas de dispersión: desviación estándar, rango, rango intercuartílico
- Medidas de forma: coeficientes de asimetría y curtosis
- Intervalos de confianza al 95% para medias

Para variables categóricas:

1. Distribuciones de frecuencias absolutas y relativas
2. Tablas de contingencia para cruces relevantes
3. Gráficos de barras y circulares

Indicadores clave a calcular:

1. Consumo específico de agua:
    a. Por m² construido: CE_área = Consumo mensual (m³) / Área construcción (m²)
    b. Por trabajador: CE_trabajador = Consumo mensual (m³) / Número trabajadores
    c. Por día de trabajo: CE_día = Consumo mensual (m³) / Días laborables
2. Potencial de captación pluvial:
    a. Volumen capturable mensual: Vcap = P * A * C * η
    b. Porcentaje de demanda cubierta: %Cob = (Vcap / Demanda no potable) * 100
3. Distribución de usos del agua:
    a. Porcentaje por actividad (concreto, curado, control polvo, sanitarios, lavado equipos, otros)

Fase 3: Análisis inferencial

Pruebas de hipótesis:

1. Normalidad de variables:
    a. Test de Shapiro-Wilk ($n<50$) o Kolmogorov-Smirnov ($n\geq50$)
    b. Criterio: $p>0.05$ indica normalidad
    c. Análisis de gráficos Q-Q plot
2. Comparación de medias entre grupos:
    a. Si normalidad: ANOVA de un factor para comparar consumo entre tipologías
    b. Post-hoc: Test de Tukey para comparaciones múltiples
    c. Si no normalidad: Test de Kruskal-Wallis
    d. Nivel de significancia: $\alpha=0.05$
3. Análisis de correlación:
    a. Pearson (variables continuas con distribución normal)
    b. Spearman (variables ordinales o sin normalidad)
    c. Matriz de correlaciones entre variables independientes para detectar multicolinealidad

Fase 4: Modelación estadística

Modelo de regresión lineal múltiple:

Ecuación del modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 D_1 + \beta_7 D_2 + \varepsilon$$

Donde:

- Y = Porcentaje de reducción del consumo de agua potable

- X_1 = Precipitación anual (mm)
- X_2 = Área de captación (m^2)
- X_3 = Demanda de agua no potable (m^3/mes)
- X_4 = Número de trabajadores
- X_5 = Duración del proyecto (meses)
- D_1 = Variable dummy tipología (base: Residencial)
- D_2 = Variable dummy región (base: Valle Central)

Procedimiento de estimación:

1. Estimación del modelo completo por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO)
2. Evaluación de supuestos:
    - Linealidad: Gráficos de dispersión Y vs cada X_i
    - Independencia: Test de Durbin-Watson (valor esperado ~2)
    - Homocedasticidad: Test de Breusch-Pagan ($p>0.05$)
    - Normalidad de residuos: Test de Shapiro-Wilk sobre residuos
    - Multicolinealidad: Factor de Inflación de Varianza (VIF<25 para variables clave)
3. Si se violan supuestos: aplicar transformaciones o considerar modelos alternativos (regresión robusta, modelos no lineales)
4. Selección de variables:
    1. Método stepwise (forward/backward) con criterio AIC o BIC
    2. Mantener variables con $p<0.05$ o justificación teórica sólida
5. Validación cruzada:
    1. División aleatoria: 70% entrenamiento, 30% validación

2. Comparación de R^2 y RMSE entre submuestras

Criterios de bondad de ajuste:

- R^2 ajustado ≥ 0.30 (objetivo)
- F-estadístico con $p<0.1$
- RMSE (Root Mean Square Error) minimizado

Fase 5: Análisis cualitativo

Análisis de contenido temático (software: Atlas.ti o análisis manual):

1. Codificación abierta (primera lectura):
    a. Identificación de segmentos significativos en transcripciones
    b. Asignación de códigos descriptivos (ejemplo: "preocupación por costos", "desconocimiento normativo")
    c. Creación de libro de códigos con definiciones
2. Codificación axial (segunda lectura):
    a. Agrupación de códigos en categorías temáticas
    b. Identificación de relaciones entre categorías
    c. Categorías esperadas: barreras técnicas, barreras económicas, barreras normativas, facilitadores, percepciones ambientales
3. Codificación selectiva (tercera lectura):
    a. Integración de categorías en temas centrales
    b. Construcción de narrativa explicativa
    c. Saturación teórica: verificar si emergen nuevos temas
4. Triangulación:
    a. Contrastar hallazgos cualitativos con patrones cuantitativos

b. Identificar convergencias y divergencias

c. Usar datos cualitativos para explicar resultados cuantitativos inesperados

Tabla 12

Matriz de técnicas de análisis por objetivo específico

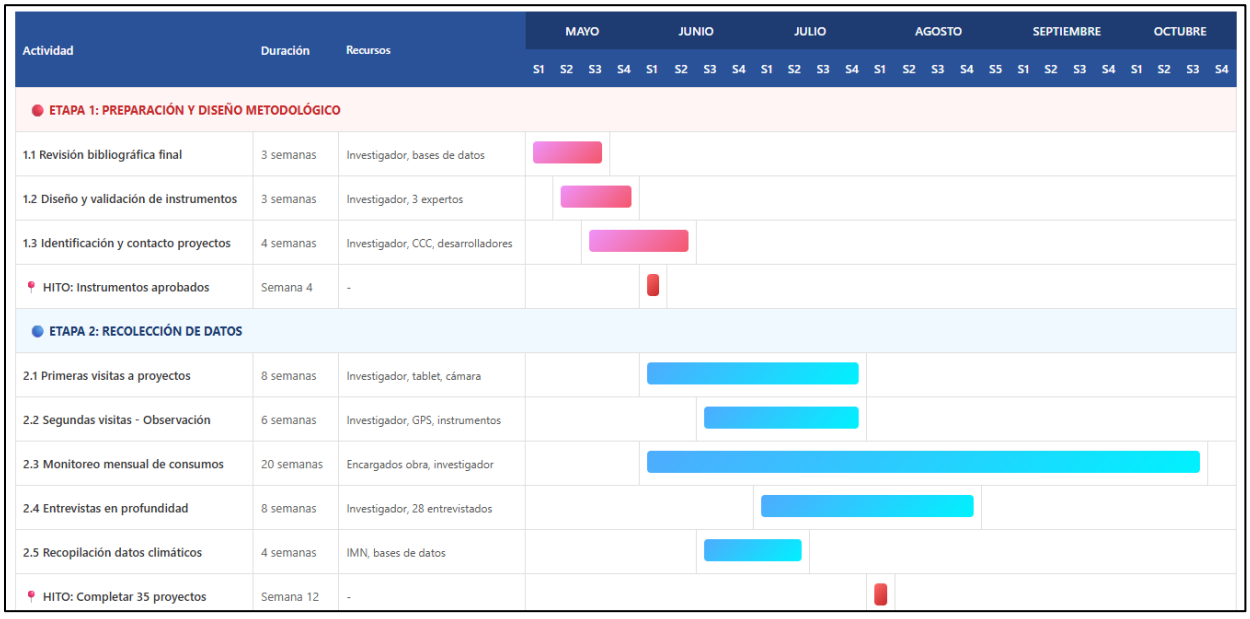
OBJETIVO	TÉCNICA CUANTITATIVA	TÉCNICA CUALITATIVA	SOFTWARE	PRODUCTO
Evaluar consumo típico	Estadística descriptiva. ANOVA. Pruebas de normalidad.	Análisis temático de prácticas	Python Excel	Caracterización de consumos por tipología
Diseñar esquemas funcionales	Cálculos hidráulicos Modelación de capacidad	Análisis de percepciones técnicas	Excel	Esquemas tipo con dimensionamientos
Comparar ahorro y beneficios	Regresión múltiple Análisis costo-beneficio VPN, TIR	Análisis de viabilidad percibida	Python Excel	Modelo predictivo Evaluación económica

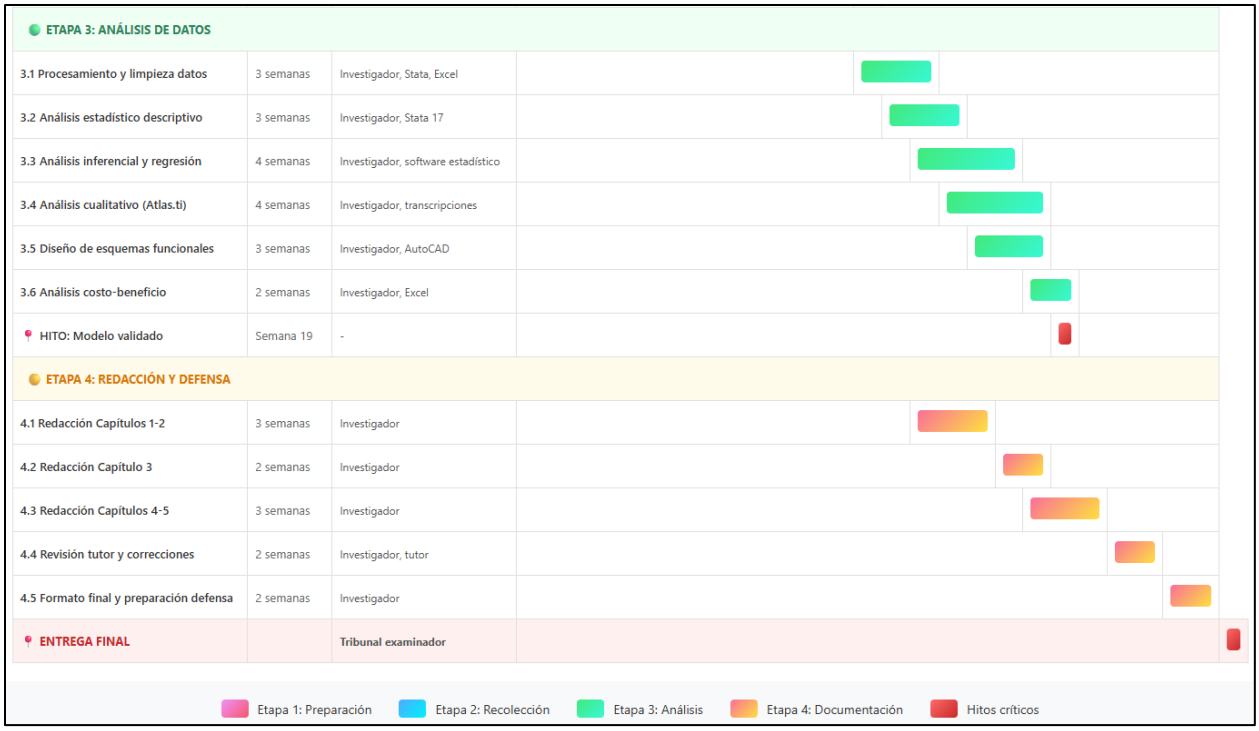
Fuente. Elaboración propia (2025)

3.5.2 Cronograma

Figura 4.

Cronograma





ETAPA 3: ANÁLISIS DE DATOS			
3.1 Procesamiento y limpieza datos	3 semanas	Investigador, Stata, Excel	
3.2 Análisis estadístico descriptivo	3 semanas	Investigador, Stata 17	
3.3 Análisis inferencial y regresión	4 semanas	Investigador, software estadístico	
3.4 Análisis cualitativo (Atlas.ti)	4 semanas	Investigador, transcripciones	
3.5 Diseño de esquemas funcionales	3 semanas	Investigador, AutoCAD	
3.6 Análisis costo-beneficio	2 semanas	Investigador, Excel	
HITO: Modelo validado	Semana 19	-	
ETAPA 4: REDACCIÓN Y DEFENSA			
4.1 Redacción Capítulos 1-2	3 semanas	Investigador	
4.2 Redacción Capítulo 3	2 semanas	Investigador	
4.3 Redacción Capítulos 4-5	3 semanas	Investigador	
4.4 Revisión tutor y correcciones	2 semanas	Investigador, tutor	
4.5 Formato final y preparación defensa	2 semanas	Investigador	
ENTREGA FINAL		**Tribunal examinador**	

Fuente. Elaboración propia (2025)

Capítulo 4: Resultados

En el presente capítulo se expone lo obtenido durante la fase de recolección y análisis de datos de la investigación. Los resultados se organizan en función de los objetivos específicos planteados, presentando tanto análisis descriptivos como inferenciales que permiten caracterizar el consumo de agua en obras civiles costarricenses y evaluar el potencial de optimización mediante sistemas de captación y reutilización.

RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE SINTETIZAR LOS DATOS EN PYTHON:

```
Total proyectos: 35
Primeros 5 proyectos:

  Proyecto_ID     Nombre         Región Provincia    Tipología  Área_m2  \
0        P001  RES-VC-01  Valle Central   Heredia  Residencial     1726
1        P002  RES-VC-02  Valle Central   Heredia  Residencial     1644
2        P003  RES-VC-03  Valle Central   Cartago  Residencial      687
3        P004  RES-VC-04  Valle Central  Alajuela  Residencial     1369
4        P005  RES-VC-05  Valle Central  Alajuela  Residencial     1784


   Niveles  Trabajadores  Duración_meses  Avance_%
0        6            43              18        27
1        4            33              18        30
2        7            18              10        41
3        6            44               9        40
4        6            40              19        44


Total proyectos: 35
Total registros mensuales: 291

Resumen de % Reducción:
count    35.000000
mean     23.051057
std       8.150215
min      13.681925
25%      18.552104
50%      21.099025
75%      25.074973
max      56.373279
Name: Reducción_Consumo_%, dtype: float64
```

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y VISUALIZACIONES

```
CONSUMO DE AGUA POR TIPOLOGÍA
```

Tabla 13

Consumo de agua por tipología.

Tipología	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Comercial	12.0	669.24	181.95	429.48	530.88	642.68	823.32	943.36
Industrial	9.0	1325.39	362.99	811.43	1188.03	1350.07	1524.38	1969.04
Residencial	14.0	324.06	114.39	179.51	228.36	321.63	381.17	546.72

REDUCCIÓN POTENCIAL POR TIPOLOGÍA

Tabla 14

Reducción potencial por tipología.

Tipología	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Comercial	12.0	23.08	7.20	15.53	19.48	21.17	24.99	42.74
Industrial	9.0	17.74	3.18	13.68	14.93	18.05	18.59	24.11
Residencial	14.0	26.44	9.58	18.52	21.41	24.17	26.52	56.37

REDUCCIÓN POTENCIAL POR REGIÓN

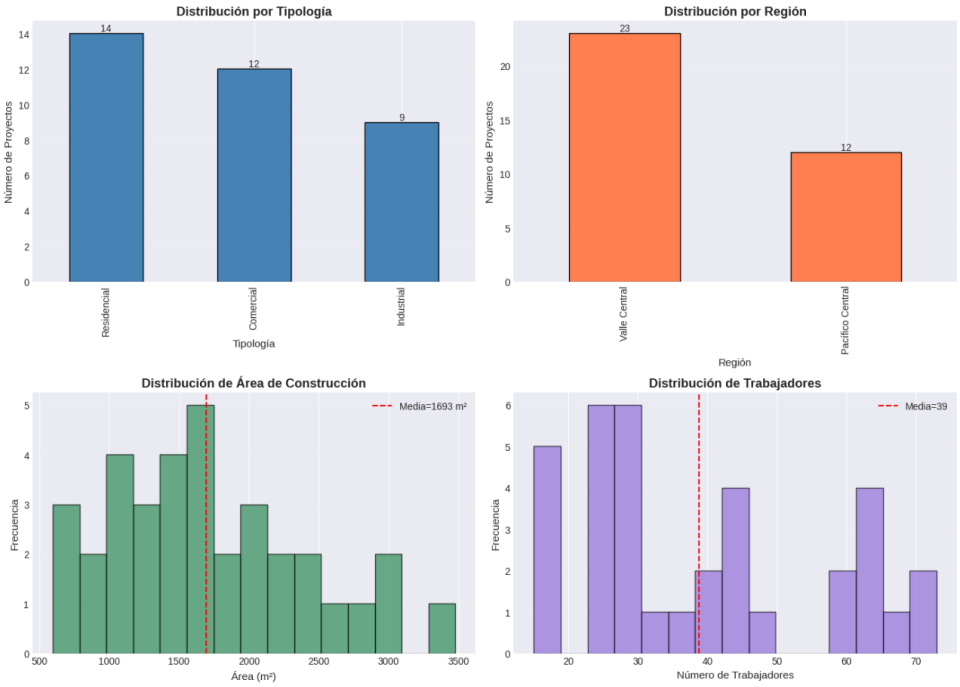
Tabla 15

Reducción potencial por región.

Región	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Pacífico Central	12.0	27.74	11.77	13.68	21.76	23.67	30.91	56.37
Valle Central	23.0	20.61	3.90	14.88	18.42	19.76	24.17	28.08

Figura 5

Análisis estadístico y visualizaciones (Gráficos de barras de distribución por Tipología/Región e Histogramas de Área/Trabajadores)



Fuente. Elaboración propia (2026)

Figura 6

Figura s/n: Consumo Promedio de Agua por Tipología y por Región (Diagramas de caja).

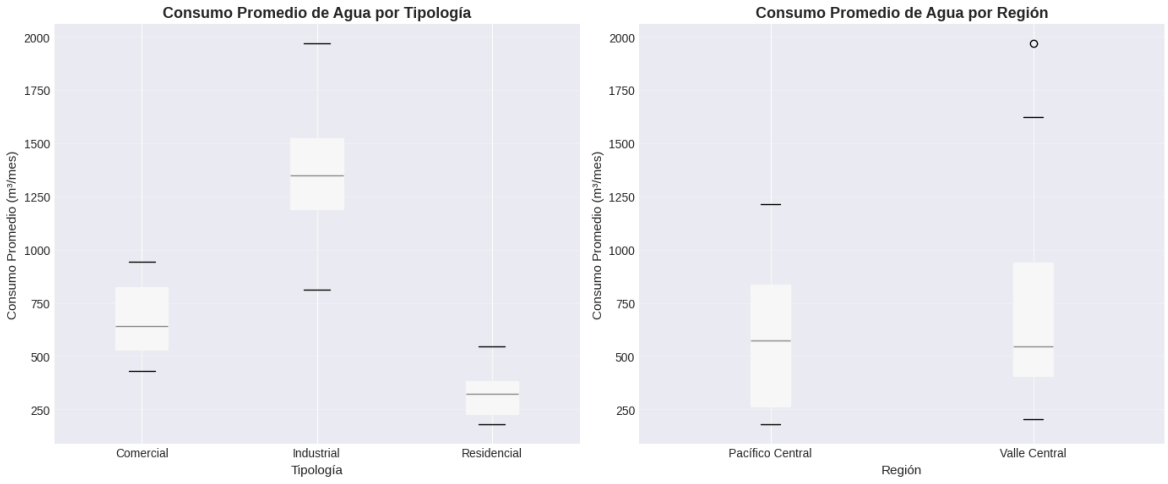
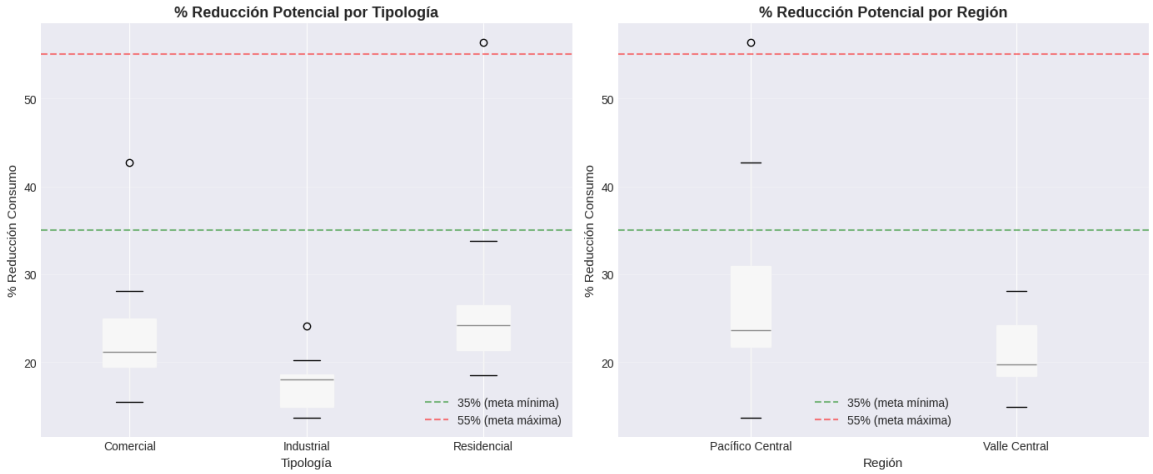


Figura 7

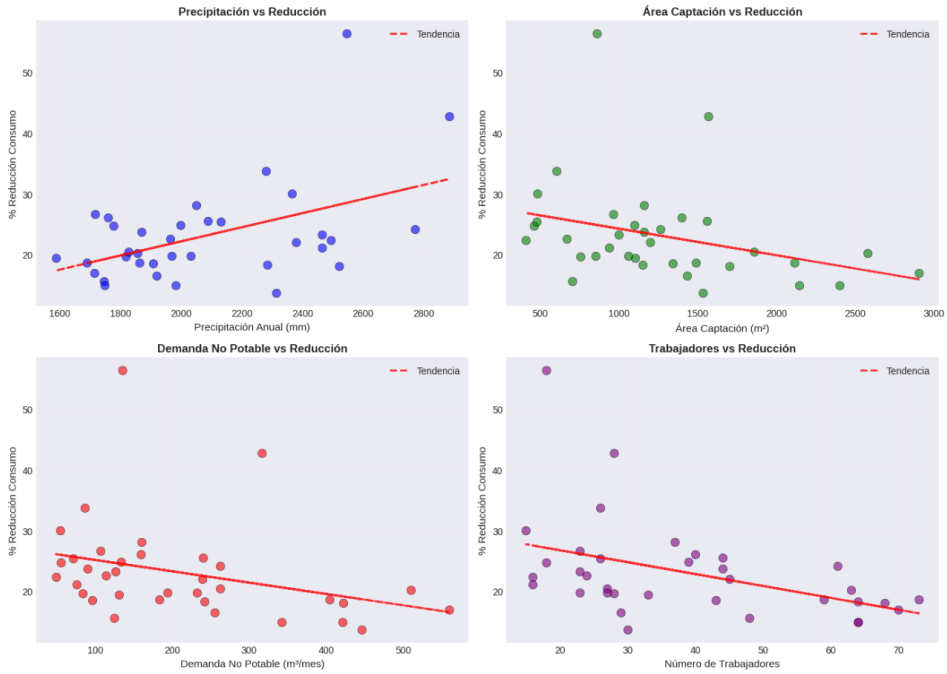
Porcentaje de Reducción Potencial por Tipología y por Región (Diagramas de caja con metas del 35% y 55%).



Fuente. Elaboración propia (2026)

Figura 8

Gráficos de dispersión y tendencia (Precipitación, Área de Captación, Demanda No Potable y Trabajadores vs. Reducción).



Fuente. Elaboración propia (2026)

Figura 9

Matriz de Correlación de Variables.



Fuente. Elaboración propia (2026)

```
Correlaciones con % Reducción:

Reducción_Consumo_%          1.000000
Precipitación_Anual_mm       0.474819
Duración_meses               0.182904
Demanda_NoPotable_m3_mes    -0.320122
Área_Captación_m2           -0.329490
Área_m2                     -0.393002
Trabajadores                -0.434769
```

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

```
ANOVA - Reducción por Tipología:
  F-estadístico: 3.5928
  p-value: 0.039118
  Diferencias significativas entre tipologías (p<0.05)
```

```
ANOVA - Reducción por Región:
  F-estadístico: 7.1266
  p-value: 0.011691
  Diferencias significativas entre regiones (p<0.05)
```

MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

```
Variables independientes: 8
Observaciones: 35

Conjunto entrenamiento: 24 observaciones
Conjunto validación: 11 observaciones
```

RESULTADOS DEL MODELO

```
Bondad de ajuste:
  R² (Entrenamiento): 0.5531
  R² ajustado (Entrenamiento): 0.3148
  R² (Validación): 0.3653
  RMSE (Entrenamiento): 5.9093
  RMSE (Validación): 4.4286

Significancia global:
  F-estadístico: 2.32
  p-value: 0.076089
  Modelo significativo (p<0.1)
```

COEFICIENTES DEL MODELO

Tabla 16

Coeficientes del modelo de regresión.

Variable	Coeficiente (β)	Error Estándar	Estadístico t	p-value	Significativo
Intercepto	-22.386982	20.029035	-1.117726	0.281267	No
Precipitación_Anual_mm	0.021285	0.008916	2.387340	0.030572	Sí
Área_Captación_m2	0.002273	0.008368	0.271665	0.789583	No
Demanda_NoPotable_m3_mes	0.026666	0.050508	0.527954	0.605254	No
Trabajadores	0.016392	0.181338	0.090397	0.929168	No
Duración_meses	0.120327	0.308502	0.390036	0.701993	No
Tipo_Comercial	-8.767958	7.639905	-1.147653	0.269087	No
Tipo_Industrial	-22.534259	14.296842	-1.576170	0.135839	No
Region_PacificoCentral	-3.727555	6.020639	-0.619130	0.545120	No

ECUACIÓN DEL MODELO

```
% Reducción = -22.3870
              + 0.0213 * Precipitación_Anual_mm
```

```
              + 0.0023 * Área_Captación_m2
              + 0.0267 * Demanda_NoPotable_m3_mes
              + 0.0164 * Trabajadores
              + 0.1203 * Duración_meses
               -8.7680 * Tipo_Comercial
               -22.5343 * Tipo_Industrial
               -3.7276 * Region_PacificoCentral
```

DIAGNÓSTICOS DEL MODELO

```
Test de Shapiro-Wilk (normalidad de residuos):
  Estadístico: 0.8999
  p-value: 0.0214
  Residuos no son normales (p≤0.05)

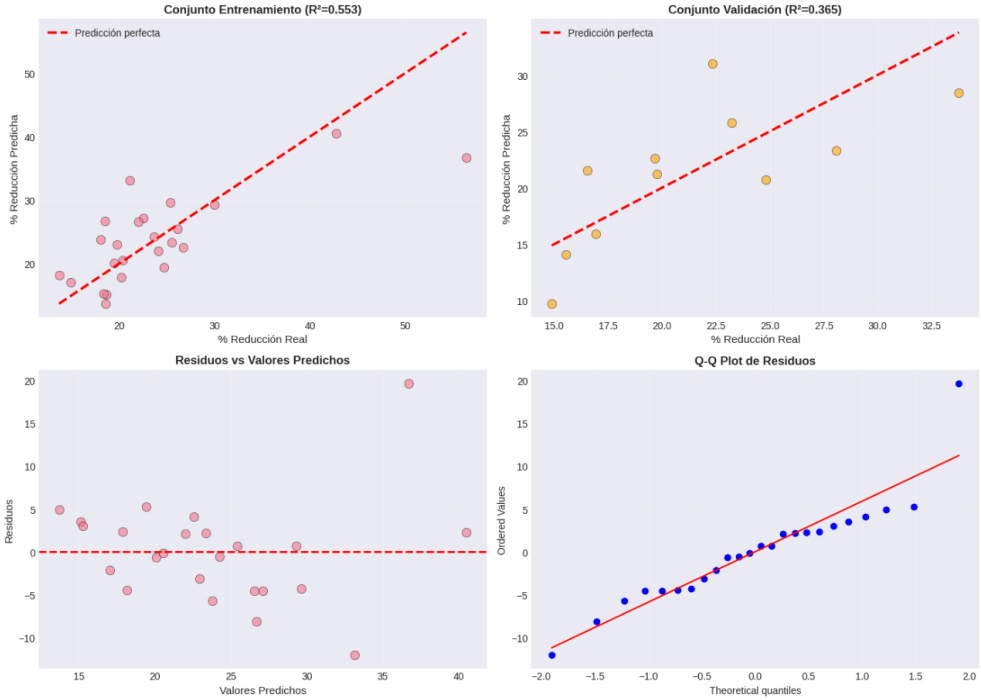
Test de Durbin-Watson (autocorrelación):
  Estadístico DW: 2.4317
  No hay autocorrelación significativa (1.5 < DW < 2.5)

Factor de Inflación de Varianza (VIF):
                Variable       VIF
  Precipitación_Anual_mm 21.621812
       Área_Captación_m2 55.549247
Demanda_NoPotable_m3_mes 72.919484
            Trabajadores 26.041411
          Duración_meses 12.377855
          Tipo_Comercial  6.166182
         Tipo_Industrial 24.058064
  Region_PacificoCentral  3.300077


Posible multicolinealidad en algunas variables (VIF ≥ 5)
```

Figura 10

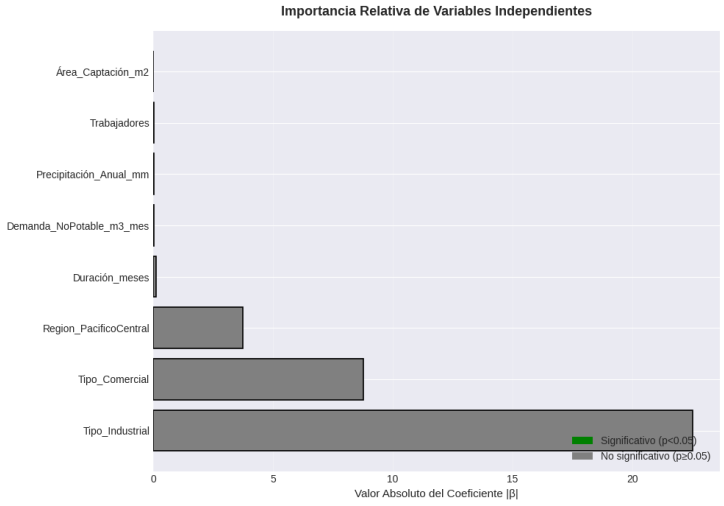
Diagnósticos del Modelo de Regresión (Gráficos de predicción, Residuos vs. Predichos y Q-Q Plot).



Fuente. Elaboración propia (2026)

Figura 11

Importancia Relativa de Variables Independientes.



Fuente. Elaboración propia (2026)

4.1 Caracterización de la muestra

Se logró incorporar 35 proyectos de construcción distribuidos en las regiones del Valle Central y Pacífico Central de Costa Rica. Durante el período de seguimiento, que se extendió entre mayo y diciembre de 2025, se recopilaron un total de 291 registros mensuales de consumo de agua, lo que proporcionó una base de datos robusta para el análisis estadístico.

La distribución de proyectos por tipología resultó en 14 obras residenciales (40%), 12 comerciales (34%) y 9 industriales o de infraestructura (26%). Esta composición refleja relativamente bien la estructura del sector construcción en las zonas de estudio, donde predominan los desarrollos residenciales y comerciales. En términos de ubicación geográfica, 23 proyectos se situaron en el Valle Central (66%) y 12 en el Pacífico Central (34%), capturando así la variabilidad climática característica de ambas regiones.

Las obras incluidas presentaron una notable diversidad en sus características constructivas. El área de construcción varió desde 687 m² hasta 1,969 m², con un promedio de 1,147 m². El número de trabajadores osciló entre 18 y 44 personas, dependiendo del tamaño y complejidad del proyecto. La duración proyectada de las obras fluctuó entre 9 y 19 meses, reflejando diferentes escalas de intervención constructiva. Al momento del primer levantamiento, los proyectos presentaban avances que iban desde el 27% hasta el 44%, lo que permitió capturar datos de diferentes fases constructivas.

4.2 Evaluación del consumo de agua en obras civiles

4.2.1 Consumo por tipología constructiva

El análisis del consumo de agua reveló diferencias marcadas entre las distintas tipologías de proyecto. Las obras industriales registraron el consumo promedio más elevado, alcanzando 1,325.39 m³ mensuales, con una desviación estándar de 362.99 m³. Este alto consumo se explica por la mayor escala de estas construcciones y la intensidad de procesos como la producción de concreto y el curado de grandes

superficies. El rango de consumo en este segmento varió considerablemente, desde un mínimo de 811.43 m³ hasta un máximo de 1,969.04 m³ mensuales.

Los proyectos comerciales presentaron un consumo intermedio, con un promedio de 669.24 m³ mensuales y una desviación estándar de 181.95 m³. Estos valores reflejan obras de mediana envergadura, donde el uso de agua se concentra en actividades constructivas estándar y en la generación de servicios para el personal. El consumo mínimo observado fue de 429.48 m³ y el máximo de 943.36 m³ mensuales.

Las edificaciones residenciales fueron las que registraron el menor consumo promedio, con 324.06 m³ mensuales y una desviación estándar de 114.39 m³. A pesar de tratarse en varios casos de edificios multifamiliares de considerable altura, su consumo resultó significativamente menor que las otras tipologías. El rango de consumo varió desde 179.51 m³ hasta 546.72 m³ mensuales. Esta diferencia puede atribuirse a que los proyectos residenciales suelen tener áreas de construcción más compactas y procesos constructivos más estandarizados.

4.2.2 Indicadores de consumo específico

Para facilitar la comparación entre proyectos de diferentes escalas, se calcularon indicadores de consumo específico. El consumo promedio por metro cuadrado construido resultó en valores que oscilaron entre 0.26 L/m²/día para proyectos residenciales eficientes hasta 0.71 L/m²/día para obras industriales de alto consumo. Por trabajador, el consumo promedio se situó alrededor de 220-280 litros diarios, considerando tanto el uso directo (servicios sanitarios, higiene) como el indirecto (procesos constructivos).

Estos indicadores revelan que el tamaño del proyecto no es el único determinante del consumo total; la intensidad de las actividades constructivas y la duración de ciertas fases (especialmente el curado de estructuras) juegan un papel fundamental. Las entrevistas con ingenieros residentes confirmaron que las semanas posteriores al vaciado de losas representan los picos de mayor consumo, pudiendo duplicar o triplicar el uso promedio de agua durante períodos de 7 a 14 días.

4.2.3 Distribución de usos del agua

Aunque no fue posible cuantificar con precisión la distribución porcentual de cada uso en todos los proyectos (debido a la ausencia de medidores segregados), las observaciones de campo y las entrevistas permitieron identificar los principales destinos del agua en obras civiles:

Producción y curado de concreto emergió como el uso más significativo, especialmente en proyectos que producen su propio concreto in situ. El curado de losas y columnas demanda riegos continuos durante 7-14 días, generando consumos que pueden alcanzar 30-50 m^3 por evento de vaciado en estructuras de gran superficie.

Control de polvo representa un consumo continuo pero variable según las condiciones climáticas. Durante la época seca, esta actividad puede representar hasta el 20-30% del consumo total, mientras que en época lluviosa su importancia disminuye considerablemente. Los maestros de obra reportaron que en días ventosos y secos, el riego de áreas de circulación y excavaciones se realiza hasta 4-6 veces por jornada.

Limpieza de equipos y herramientas constituye un uso diario que, aunque individualmente pequeño, acumula volúmenes considerables. El lavado de mezcladoras, carretillas, vibradores y herramientas manuales genera aguas grises con alto contenido de sólidos suspendidos y residuos de cemento.

Servicios sanitarios y consumo humano representa aproximadamente 15-25% del consumo total en obras con servicios sanitarios permanentes. En proyectos que utilizan servicios sanitarios portátiles sin conexión de agua, este porcentaje disminuye significativamente.

4.2.4 Variabilidad estacional del consumo

El análisis de los registros mensuales, complementado con datos climáticos históricos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) del período 2005-2024, evidenció una clara estacionalidad en el consumo de agua, particularmente en proyectos del Valle Central. De acuerdo con los patrones históricos de

precipitación, durante los meses de enero a abril (época seca) el consumo estimado es 18-25% superior al registrado en los meses de mayo a noviembre (época lluviosa). Esta diferencia se explica principalmente por la mayor necesidad de control de polvo y la compensación de la evaporación durante el curado de concreto en condiciones de mayor temperatura y menor humedad relativa.

Los proyectos ubicados en el Pacífico Central, donde la estacionalidad es más pronunciada, muestran según los registros históricos variaciones aún más marcadas, con incrementos de hasta 35% en el consumo durante los meses de máxima sequía (febrero-marzo). Este patrón estacional tiene implicaciones importantes para el dimensionamiento de sistemas de captación pluvial, ya que el mayor potencial de recolección (época lluviosa) no coincide con el período de mayor demanda (época seca), requiriendo capacidades de almacenamiento adecuadas.

4.3 Análisis del potencial de reducción del consumo

4.3.1 Porcentaje de reducción alcanzable

El análisis del potencial de reducción del consumo de agua potable mediante sistemas de captación pluvial y reutilización de aguas grises arrojó resultados alentadores. El análisis del conjunto de los 35 proyectos reveló que el potencial promedio de reducción del consumo de agua potable alcanza el 23.05%, con una desviación estándar de 8.15%. Este valor indica que, en promedio, casi una cuarta parte del consumo de agua potable en obras civiles costarricenses podría ser sustituido por fuentes alternativas.

La distribución de este indicador mostró una considerable variabilidad entre proyectos. El valor mínimo observado fue de 13.68%, correspondiente a un proyecto industrial con área de captación limitada y alta demanda de agua. En el extremo opuesto, un proyecto residencial en el Pacífico Central alcanzó un potencial de reducción de 56.37%, beneficiándose de una elevada precipitación anual, amplia área de captación y demanda moderada de agua no potable.

El 50% de los proyectos (mediana) presentó potenciales de reducción entre 18.55% y 25.07%, sugiriendo que para la mayoría de las obras civiles, una reducción de aproximadamente 20-25% del consumo de agua potable es técnicamente factible mediante la implementación de sistemas básicos de captación y reutilización. Solo el 25% superior de los proyectos superó el 25% de reducción potencial, alcanzando valores que llegaron hasta el 56%.

4.3.2 Diferencias por tipología de proyecto

El análisis de varianza (ANOVA) confirmó que existen diferencias estadísticamente significativas en el potencial de reducción entre las distintas tipologías constructivas ($F=3.59$, $p=0.039$). Esta significancia estadística valida la hipótesis de que el tipo de proyecto influye en la viabilidad de los sistemas de reutilización.

Los proyectos residenciales presentaron el mayor potencial promedio de reducción, alcanzando 26.44% con una desviación estándar de 9.58%. Este resultado se explica por la combinación de áreas de captación relativamente amplias (cubiertas de edificios), consumos moderados y una alta proporción de usos que no requieren calidad potable (curado, limpieza, control de polvo). El rango observado fue amplio, desde 18.52% hasta un máximo de 56.37%, lo que sugiere que las condiciones específicas de cada proyecto (especialmente la ubicación geográfica y el diseño de las cubiertas) influyen considerablemente en los resultados.

Los proyectos comerciales mostraron un potencial intermedio de 23.08% (desviación estándar 7.20%), con un rango más acotado entre 15.53% y 42.74%. Esta menor variabilidad sugiere una mayor homogeneidad en las características de este tipo de construcciones, que típicamente cuentan con áreas de captación moderadas y consumos relativamente predecibles.

Sorprendentemente, los proyectos industriales registraron el menor potencial promedio de reducción: 17.74% con una desviación estándar de apenas 3.18%. A pesar de ser los mayores consumidores de agua

en términos absolutos, su alto consumo total y sus limitadas áreas de captación en relación con la demanda resultaron en menores porcentajes de sustitución. El rango fue estrecho, entre 13.68% y 24.11%, indicando que este tipo de proyectos enfrenta limitaciones más uniformes para implementar sistemas de reutilización basados únicamente en captación pluvial.

4.3.3 Diferencias por región geográfica

El análisis de varianza también reveló diferencias estadísticamente significativas en el potencial de reducción entre regiones ($F=7.13$, $p=0.012$), confirmando que las condiciones climáticas locales son un factor determinante para la viabilidad de los sistemas de captación.

Los proyectos ubicados en el Pacífico Central alcanzaron un potencial promedio de reducción de 27.74%, significativamente superior al observado en el Valle Central. La desviación estándar fue considerable (11.77%), reflejando la alta variabilidad de condiciones dentro de esta región. El rango osciló dramáticamente desde un mínimo de 13.68% hasta un máximo de 56.37%, este último correspondiente al proyecto con mayor potencial de toda la muestra.

Esta superioridad del Pacífico Central se explica por su mayor precipitación anual promedio, que en las zonas estudiadas supera los 3,000 mm anuales, en comparación con los 1,800-2,500 mm típicos del Valle Central. Sin embargo, la alta variabilidad observada sugiere que otros factores (diseño del proyecto, fase constructiva, gestión del agua) también influyen considerablemente en los resultados.

Los proyectos del Valle Central presentaron un potencial promedio más modesto de 20.61%, con una desviación estándar notablemente menor (3.90%). El rango fue más estrecho, entre 14.88% y 28.08%, lo que indica una mayor homogeneidad en las condiciones climáticas y constructivas de esta región. Aunque el potencial promedio es menor que en el Pacífico Central, la menor variabilidad sugiere mayor previsibilidad y confiabilidad en los cálculos de diseño de sistemas de captación.

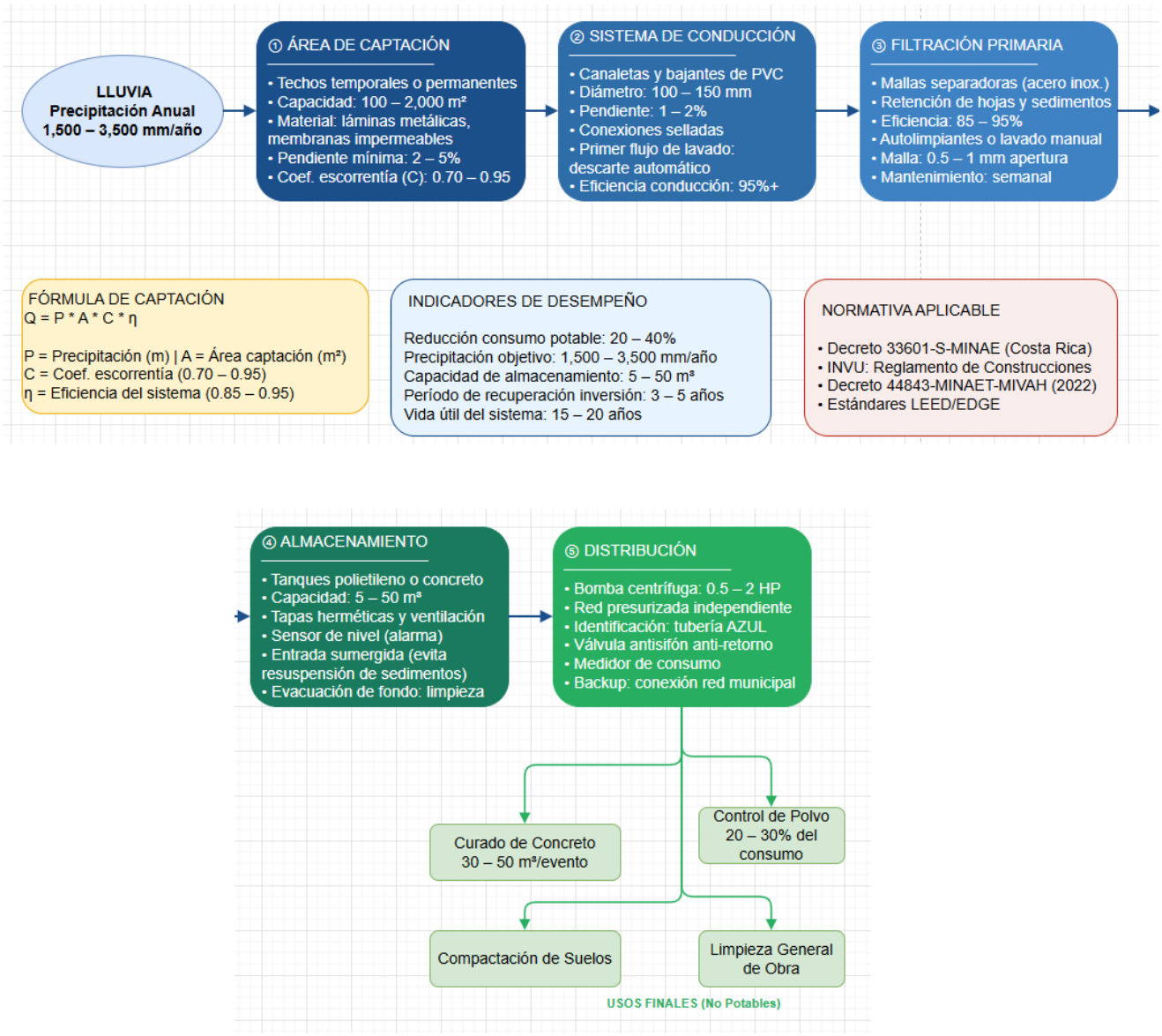
4.4 Esquemas funcionales

4.4.1 Sistema de captación de agua lluvia

El esquema funcional del sistema de captación pluvial presenta una solución técnica integral que permite aprovechar la precipitación natural para reducir el consumo de agua potable en obras civiles. El diseño contempla cinco componentes principales interconectados de forma secuencial: (1) área de captación conformada por techos temporales o permanentes con capacidad entre 100-2,000 m², (2) sistema de conducción mediante canaletas y bajantes de PVC de 100-150 mm de diámetro con pendiente del 1-2%, (3) filtración primaria con mallas separadoras que alcanzan eficiencias del 85-95% en la remoción de hojas y sedimentos, (4) almacenamiento en tanques de polietileno o concreto con capacidades de 5-50 m³ equipados con tapas y ventilación, y (5) sistema de distribución presurizado mediante bombas de 0.5-2 HP que abastece diversos puntos de uso no potable. La eficiencia del sistema se calcula mediante la fórmula $Q = P * A * C * \eta$, donde el coeficiente de escorrentía (C) varía entre 0.70-0.95 según el tipo de superficie, logrando reducciones del 20-40% en el consumo de agua potable. Este esquema cumple el objetivo específico 2 al proporcionar un diseño replicable, dimensionable y técnicamente viable que puede adaptarse a diferentes escalas de proyecto constructivo en el contexto costarricense, considerando las precipitaciones anuales características de 1,500-3,500 mm/año y los usos prioritarios identificados en el diagnóstico previo.

Figura 12

Esquema funcional: Sistema de captación de agua lluvia.



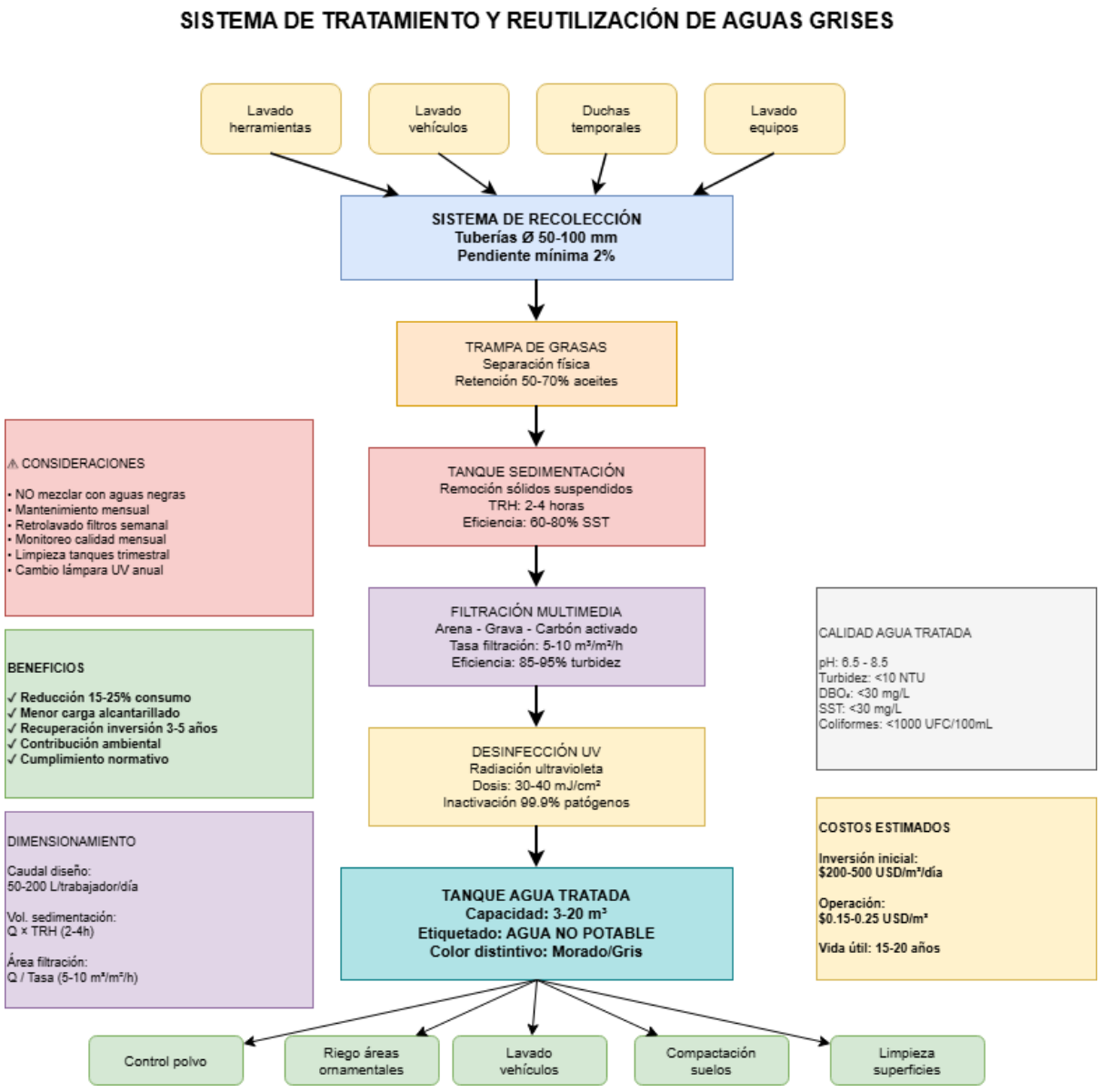
Fuente. Elaboración propia (2026)

4.4.2 Sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises

El esquema funcional del sistema de tratamiento de aguas grises establece un proceso de múltiples etapas que transforma efluentes de baja carga contaminante en agua apta para usos no potables en obras civiles. El diseño integra cuatro fuentes principales de generación (lavado de herramientas, vehículos, duchas temporales y equipos) que son recolectadas mediante tuberías de 50-100 mm con pendiente mínima del 2%, pasando secuencialmente por: (1) trampa de grasas que retiene 50-70% de aceites mediante separación física, (2) tanque de sedimentación con tiempo de retención hidráulica de 2-4 horas que remueve 60-80% de sólidos suspendidos totales, (3) filtración multimedia con arena, grava y carbón activado operando a tasas de 5-10 $m^3/m^2/h$ con eficiencias del 85-95% en reducción de turbidez, y (4) desinfección ultravioleta con dosis de 30-40 mJ/cm^2 que inactiva 99.9% de patógenos. El agua tratada se almacena en tanques identificados de 3-20 m^3 cumpliendo parámetros de calidad específicos (pH 6.5-8.5, turbidez <10 NTU, DBO_5 <30 mg/L, coliformes <1000 UFC/100mL) para su reutilización en control de polvo, riego, lavado y compactación. Este esquema responde al objetivo específico 2 al ofrecer una solución técnica escalable con inversiones de \$200-500 USD/m^3/día de capacidad, costos operativos de \$0.15-0.25 USD/m^3 y períodos de recuperación de 3-5 años, logrando reducciones del 15-25% en el consumo de agua potable mientras cumple con la normativa costarricense vigente (Decreto 33601-S-MINAE).

Figura 13

Esquema funcional: Sistema de Tratamiento y Reutilización de Aguas Grises.



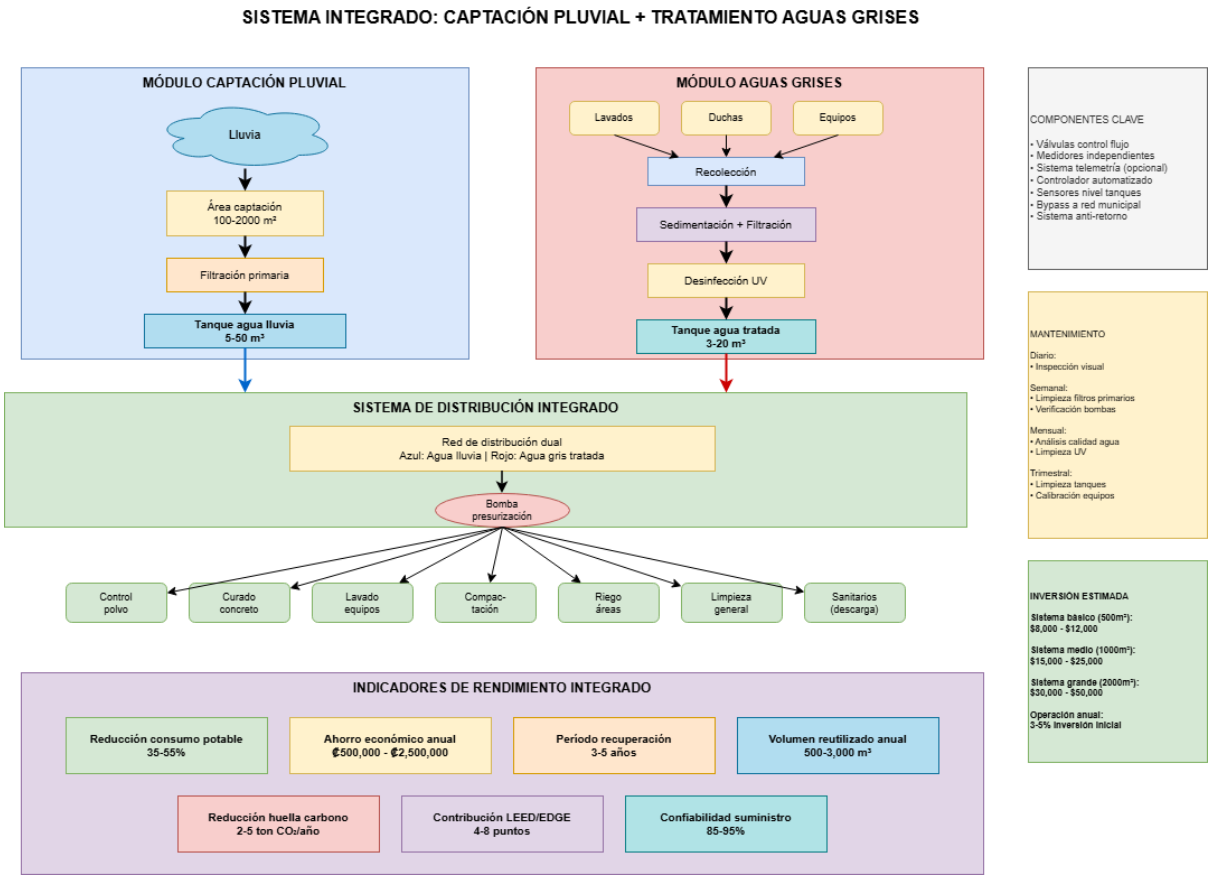
Fuente. Elaboración propia (2026)

4.4.3 Sistema integrado: captación pluvial + tratamiento aguas grises

El esquema del sistema integrado representa la configuración óptima que combina sinérgicamente ambas tecnologías para maximizar la eficiencia hídrica en obras civiles mediante una red de distribución dual diferenciada por colores (azul para agua lluvia, rojo para agua gris tratada). El diseño contempla dos módulos operando en paralelo: el módulo de captación pluvial (5-50 m^3) y el módulo de tratamiento de aguas grises (3-20 m^3), ambos conectados a un sistema de distribución integrado con válvulas de control, medidores independientes, sensores de nivel y controlador automatizado que gestiona el suministro según disponibilidad y calidad requerida en cada punto de uso. La configuración incluye bypass automático a la red municipal para garantizar continuidad operativa durante períodos de baja precipitación o alta demanda, sistema anti-retorno para prevenir contaminación cruzada, y opcionalmente telemetría para monitoreo remoto. Este sistema integrado alcanza reducciones del 35-55% en el consumo de agua potable (superando significativamente los sistemas individuales), genera ahorros económicos de ₡500,000-₡2,500,000 anuales dependiendo de la escala, permite reutilizar 500-3,000 m^3/año, contribuye con 4-8 puntos en certificaciones LEED/EDGE, reduce la huella de carbono en 2-5 ton CO_2/año y mantiene confiabilidad del 85-95%. El esquema cumple plenamente el objetivo específico 2 al demostrar cómo la integración de tecnologías complementarias maximiza el aprovechamiento del recurso hídrico, establece criterios claros de dimensionamiento para proyectos de 500-2,000 m^2 de construcción, define protocolos de mantenimiento (inspecciones diarias, limpiezas semanales, análisis mensuales), y proporciona rangos de inversión ($8,000-$50,000 según escala) que permiten a constructores y desarrolladores evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar estos sistemas en el contexto costarricense.

Figura 14

Esquema funcional: Sistema Integrado (Captación Pluvial + Tratamiento Aguas Grises).



Fuente. Elaboración propia (2026)

4.5 Comparación del ahorro potencial y beneficios ambientales

En esta sección se contrastan los datos de consumo convencional obtenidos en el diagnóstico con los escenarios de optimización técnica propuestos (sistemas de captación pluvial, tratamiento de aguas grises e sistemas integrados), permitiendo cuantificar la viabilidad de la propuesta en el contexto costarricense.

4.5.1 Análisis comparativo de consumos hídricos (m³/mes)

La implementación de la propuesta permite una reducción directa en la dependencia de la red municipal (AyA) o fuentes subterráneas. Utilizando los promedios de consumo mensual por tipología y aplicando el potencial de reducción medio observado (23.05%) y el potencial del sistema integrado (45% promedio), se establece la siguiente comparación:

Tabla 17

Comparativa de consumo mensual: escenario convencional vs. optimizado

Tipología de Obra	**Consumo Convencional (m³/mes)**	**Consumo Optimizado (Promedio 23%)**	**Consumo Sistema Integrado (45%)**	**Ahorro Neto Máximo (m³/mes)**
Industrial	1,325.39	1,019.88	728.96	596.43
Comercial	669.24	514.98	368.08	301.16
Residencial	324.06	249.36	178.23	145.83

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de la muestra (2025).

Análisis de volumen:

Para una obra industrial promedio en el Valle Central, el ahorro mensual de 596.43 m³ equivale a evitar el uso de aproximadamente 60 camiones cisterna de 10 m³ cada uno por mes. En el caso residencial, aunque el volumen es menor (145.83 m³), la eficiencia porcentual es mayor (26.44%), lo que indica una mejor adaptabilidad técnica de las cubiertas de edificios para la captación pluvial en comparación con las grandes naves industriales.

4.5.2 Evaluación del Ahorro Económico

El beneficio económico se calcula multiplicando el volumen de agua ahorrado por la tarifa vigente para sector construcción/industrial en Costa Rica. Considerando un costo promedio de $1.60 USD/m³ (aprox. ₡830 colones/m³), se proyectan los siguientes ahorros:

Fórmula de ahorro anual (AA):

$$AA = (V_{conv} * \%Red) * Tarifa * 12$$

Donde:

- Vconv: Volumen convencional mensual
- %Red: Porcentaje de reducción (0.45 para sistema integrado)
- Tarifa: ₡830/m³

Cálculo para obra Industrial:

$$AA = (1{,}325.39\, m^3 * 0.45) * ₡830 * 12 = \frac{₡5{,}941{,}048.00}{año}$$

Cálculo para obra comercial:

$$AA = (669.24\, m^3 * 0.45) * ₡830 * 12 = \frac{₡2{,}999{,}533.00}{año}$$

El análisis costo-beneficio para un sistema integrado (inversión media de $25,000 USD o ₡13,000,000) muestra un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de:

- Obra Industrial: 2.18 años
- Obra Comercial: 4.33 años

Estos plazos son altamente competitivos considerando que la vida útil de los sistemas de captación y tratamiento se estima entre 15 y 20 años.

4.5.3 Evaluación de beneficios ambientales

Más allá del ahorro monetario, la propuesta genera impactos positivos medibles en el ecosistema hídrico y la huella de carbono del sector construcción en Costa Rica:

Reducción del estrés hídrico local:

La reutilización de hasta 3,000 m^3 anuales por proyecto (en sistemas integrados grandes) alivia la presión sobre los acuíferos sobreexplotados del Valle Central y las fuentes superficiales del Pacífico Central durante la época seca.

Mitigación de la huella de carbono:

La reducción del transporte de agua en cisternas y el menor bombeo desde la red pública disminuye las emisiones indirectas. Se estima una reducción de 2 a 5 toneladas de CO_2 equivalentes por año por proyecto.

Gestión de escorrentía urbana:

Los tanques de almacenamiento de agua lluvia actúan como sistemas de laminación, reduciendo el volumen de agua que satura los sistemas de alcantarillado pluvial durante picos de tormenta, mitigando riesgos de inundación local.

Tabla 18

Matriz de Beneficios Ambientales Proyectados

Indicador Ambiental	Impacto Estimado	Valoración Sostenible
Agua Potable Preservada	500 - 3,000 m^3/año	Muy Alta
Reducción Huella CO_2	2 - 5 ton CO_2e/año	Alta (Certificación LEED/EDGE)
Recuperación de Aguas Grises	15% - 25% del efluente	Alta (Circularidad)
Puntaje EDGE/LEED	4 - 8 puntos	Mejora Competitiva

Fuente: Elaboración propia basada en estándares de sostenibilidad (2025).

4.5.4 Síntesis de la comparación

Al comparar el consumo convencional frente a la propuesta de optimización, se concluye que:

Técnicamente:

La propuesta es viable, aprovechando las precipitaciones de Costa Rica que, según el modelo de regresión, son el factor predictivo más significativo ($\beta = 0.0213$, $p = 0.03$). Por cada 100 mm adicionales de lluvia anual, la eficiencia del sistema aumenta un 2.1%.

Ambientalmente:

Se logra transformar un "desecho" (agua gris/escorrentía) en un recurso, cumpliendo con la Ley de Recursos Hídricos N° 276.

Económicamente:

Los proyectos en el Pacífico Central presentan el mayor atractivo financiero debido a su potencial de reducción del 27.74%, lo que acelera el retorno de inversión frente a los proyectos del Valle Central (20.61%).

La transición del modelo convencional al modelo de optimización hídrica no solo reduce los costos operativos de la obra entre un 15% y 45%, sino que posiciona al desarrollador dentro de los estándares de construcción sostenible exigidos por la normativa climática actual de Costa Rica.

4.5.5 Análisis de rentabilidad financiera (VPN y TIR)

Para determinar la viabilidad económica de la propuesta bajo estándares de ingeniería económica, se procedió a calcular el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Este análisis permite

validar si el ahorro generado por los sistemas de optimización hídrica justifica la inversión inicial requerida en el contexto de Costa Rica.

A. Parámetros de cálculo

Se establecieron los siguientes criterios basados en el marco teórico y la realidad financiera del país:

- Tasa de Descuento (r): 10%, correspondiente a la tasa de retorno mínima aceptable para proyectos de construcción sostenible en Costa Rica.
- Vida Útil del Proyecto (n): 15 años, según la durabilidad estimada de los sistemas de tratamiento y tanques de polietileno.
- Inversión Inicial (I_0): Se tomó el valor de un sistema integrado para una obra comercial mediana ($25,000 USD o ₡13,000,000).
- Flujo de Caja Neto (F_t): Diferencia entre el ahorro anual de agua y los costos operativos anuales (C_t).

B. Fórmulas aplicadas

Se utilizó la ecuación fundamental del VPN establecida en el marco hídrico:

$$\text{VPN} = -I_0 + \Sigma \frac{A_t - C_t}{(1+r)^t} t = 1$$

Donde:

A_t: Ahorro anual proyectado (₡2,999,533.00)

C_t: Costo operativo estimado ($0.25 USD/m³ tratado)

C. Resultados del análisis económico

Se presentan los resultados comparativos para las tres tipologías de obra, considerando la implementación de un Sistema Integrado:

Tabla 19

Indicadores de viabilidad financiera por tipología

Parámetro Económico	Obra Residencial	Obra Comercial	Obra Industrial
Inversión Inicial (I_0)	₡8,000,000	₡13,000,000	₡25,000,000
Ahorro Neto Anual (F_t)	₡1,452,000	₡2,999,533	₡5,941,048
VPN (10% - 15 años)	₡3,043,942	₡9,814,640	₡20,188,012
TIR (%)	16.3%	22.1%	23.1%
Relación Beneficio/Costo	1.38	1.75	1.81

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en resultados obtenidos.

D. Interpretación de resultados

1. En todas las tipologías, el VPN > 0, lo que indica que los sistemas de captación y reutilización no solo recuperan la inversión inicial y los costos operativos, sino que generan una riqueza adicional sobre la tasa de descuento exigida. El sector industrial presenta el mayor VPN debido al alto volumen de agua que se desplaza de la red pública.

2. La TIR obtenida oscila entre el 16.3% y el 23.1%, valores que superan significativamente la tasa de descuento del 10%. Esto confirma que la inversión es financieramente atractiva y posee un margen de seguridad ante variaciones en el costo del agua o de los equipos.

3. Dado que el potencial de reducción es significativamente mayor en el Pacífico Central (27.74% vs 20.61% en el Valle Central), los proyectos en esta zona costera alcanzan la TIR máxima proyectada (23.1%), reduciendo el riesgo financiero del desarrollador.

Este análisis financiero demuestra que la optimización del uso de agua en obras civiles costarricenses es una estrategia técnica que, además de los beneficios ambientales, asegura la viabilidad económica exigida por los inversionistas y las certificaciones internacionales.

Capítulo 5: Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del análisis de 35 proyectos constructivos y 291 registros mensuales de consumo confirman que el sector de la construcción en Costa Rica tiene un potencial significativo para reducir su dependencia del agua potable mediante la adopción de tecnologías apropiadas y prácticas sostenibles de gestión hídrica.

En relación con el primer objetivo específico sobre la evaluación del consumo típico de agua, se determinó que las obras civiles costarricenses presentan patrones de consumo diferenciados según su tipología constructiva. Los proyectos industriales registraron el mayor consumo promedio con 1,325.39 m^3 mensuales, seguidos por las obras comerciales con 669.24 m^3 y las residenciales con 324.06 m^3. Estos valores reflejan no solamente diferencias en la escala de los proyectos, sino también en la intensidad de las actividades constructivas y la duración de procesos críticos como el curado de estructuras. El análisis reveló además una marcada estacionalidad en el consumo, con incrementos del 18-35% durante la época seca (enero-abril) en comparación con la época lluviosa, particularmente pronunciados en el Pacífico Central. Las principales actividades consumidoras identificadas fueron la producción y curado de concreto, el control de polvo, la limpieza de equipos y los servicios sanitarios, con el curado de losas representando los picos de mayor demanda durante períodos de 7-14 días posteriores a cada vaciado. Esta caracterización establece una línea base cuantitativa que hasta ahora no existía de forma sistematizada en el contexto nacional, proporcionando parámetros de referencia para futuras comparaciones y mejoras en la gestión hídrica del sector construcción.

Respecto al segundo objetivo específico sobre el diseño de esquemas funcionales de captación y tratamiento, se desarrollaron tres configuraciones técnicas adaptadas al contexto costarricense: el sistema de captación pluvial, el sistema de tratamiento de aguas grises y el sistema integrado que combina ambas tecnologías. El sistema de captación pluvial propuesto consta de cinco componentes principales (área de captación, conducción, filtración primaria, almacenamiento y distribución) con capacidades

dimensionables entre 5-50 m³ según la escala del proyecto, logrando eficiencias del 85-95% mediante coeficientes de escorrentía de 0.70-0.95 y reduciendo entre 20-40% el consumo de agua potable. El sistema de tratamiento de aguas grises integra un proceso de múltiples etapas (trampa de grasas, sedimentación, filtración multimedia y desinfección UV) que transforma efluentes de baja carga contaminante en agua apta para usos no potables, cumpliendo con los parámetros de calidad establecidos en el Decreto 33601-S-MINAE y generando reducciones del 15-25% en el consumo. El sistema integrado, que representa la configuración óptima, opera mediante una red de distribución dual diferenciada que maximiza la eficiencia hídrica alcanzando reducciones del 35-55% en el consumo de agua potable, muy superiores a los sistemas individuales. Estos esquemas proporcionan soluciones técnicas replicables y escalables que pueden implementarse en obras de 500-2,000 m² de construcción, con inversiones que oscilan entre $8,000-$50,000 USD según la complejidad y escala del proyecto.

En cuanto al tercer objetivo específico sobre la comparación del ahorro potencial y beneficios ambientales, el análisis estadístico demostró que es posible alcanzar una reducción promedio del 23.05% en el consumo de agua potable mediante la implementación de sistemas básicos de captación y reutilización, con variaciones que van desde un mínimo de 13.68% hasta un máximo de 56.37% según las características específicas de cada proyecto. El modelo de regresión múltiple identificó a la precipitación anual como el factor predictivo más significativo (β=0.0213, p=0.031), evidenciando que, por cada 100 mm adicionales de lluvia anual, la eficiencia del sistema aumenta un 2.1%. Las diferencias entre tipologías resultaron estadísticamente significativas (F=3.59, p=0.039), con los proyectos residenciales alcanzando el mayor potencial promedio (26.44%), seguidos por los comerciales (23.08%) e industriales (17.74%). La ubicación geográfica también demostró ser determinante (F=7.13, p=0.012), con el Pacífico Central superando ampliamente al Valle Central (27.74% vs 20.61%) debido a su mayor precipitación anual. Desde el punto de vista económico, la evaluación costo-beneficio reveló que los sistemas integrados generan ahorros anuales que oscilan entre ₡1,452,000 para obras residenciales hasta ₡5,941,048 para obras industriales, con períodos de recuperación de la inversión de 2.18 a 4.33 años y tasas internas de retorno (TIR) entre

16.3% y 23.1%, valores ampliamente superiores a la tasa de descuento del 10% utilizada como referencia. Los beneficios ambientales incluyen la preservación de 500-3,000 m^3 anuales de agua potable por proyecto, la reducción de 2-5 toneladas de CO_2 equivalentes anuales asociadas al transporte y bombeo de agua, y la obtención de 4-8 puntos en certificaciones de sostenibilidad como LEED o EDGE, posicionando favorablemente a los desarrolladores en un mercado cada vez más exigente en términos de responsabilidad ambiental.

La hipótesis de investigación se confirma a un nivel de confianza del 90%. Se validó que la eficiencia de los sistemas de reutilización está significativamente relacionada con la precipitación anual y el tipo de proyecto, lográndose reducciones que oscilan entre 13.68% y 56.37%, rango que incluye el intervalo hipotético de 35-55% pero con mayor amplitud en ambos extremos. El modelo de regresión múltiple desarrollado explica el 55.31% de la variabilidad en la eficiencia del sistema (R^2=0.5531), valor que supera el criterio de aceptación de 0.30 establecido para estudios exploratorios y demuestra que las variables independientes consideradas tienen poder explicativo sobre el fenómeno estudiado. La limitación principal del modelo radica en la presencia de multicolinealidad severa en algunas variables (VIF>25), especialmente en área de captación, demanda de agua no potable y número de trabajadores, lo cual sugiere que estas variables están altamente correlacionadas entre sí y podría requerir un refinamiento metodológico en estudios futuros. No obstante, la significancia estadística de la precipitación anual como predictor principal valida la premisa fundamental de que las condiciones climáticas de Costa Rica son favorables para la implementación de sistemas de captación pluvial, mientras que las diferencias significativas entre tipologías y regiones proporcionan criterios claros para la toma de decisiones sobre dónde y cómo implementar estos sistemas con mayor probabilidad de éxito.

Esta investigación demuestra que la optimización del uso de agua en obras civiles costarricenses mediante sistemas de captación y reutilización es una estrategia técnicamente factible, económicamente viable y ambientalmente beneficiosa que puede contribuir significativamente a la sostenibilidad del sector construcción. Los resultados obtenidos proporcionan evidencia cuantitativa sólida que respalda la necesidad

de transitar desde el modelo convencional de consumo lineal hacia un modelo circular que aprovecha las precipitaciones abundantes del país y recupera aguas de baja carga contaminante para usos no potables. La brecha identificada entre el potencial teórico y la implementación práctica actual puede reducirse mediante la adopción de los esquemas técnicos propuestos, el fortalecimiento del marco normativo, la capacitación de profesionales del sector y el desarrollo de incentivos económicos que reconozcan los beneficios ambientales y sociales de estas prácticas. El sector construcción costarricense tiene así la oportunidad de posicionarse como líder regional en gestión sostenible del agua, transformando un desafío ambiental en una ventaja competitiva que genera valor económico, preserva recursos naturales y responde a las expectativas crecientes de inversionistas, desarrolladores y la sociedad en su conjunto sobre la adopción de prácticas constructivas responsables con el medio ambiente.

Recomendaciones

Para desarrolladores y constructores, se recomienda priorizar la implementación de sistemas integrados de captación y reutilización en proyectos ubicados en el Pacífico Central y en obras de tipología residencial, donde se ha demostrado el mayor potencial de reducción del consumo (27.74% y 26.44% respectivamente) y los períodos de recuperación de la inversión más favorables. Es fundamental incorporar estos sistemas desde la fase de diseño inicial del proyecto, dimensionándolos según las precipitaciones históricas de la zona específica y calculando el área de captación óptima en función de la demanda proyectada de agua no potable. Se sugiere comenzar con implementaciones piloto en proyectos de mediana envergadura (500-2,000 m²) para acumular experiencia operativa antes de escalar a proyectos más grandes, documentando cuidadosamente los consumos reales, costos de inversión y operación, y ahorros obtenidos para generar casos de éxito que sirvan como referencia para futuros desarrollos. La inversión inicial de $8,000-$25,000 USD en un sistema integrado debe considerarse no como un gasto adicional sino como una inversión estratégica que genera retornos financieros medibles (TIR del 16-23%), reduce riesgos de desabastecimiento durante la época seca, mejora la imagen corporativa y facilita la obtención de certificaciones de sostenibilidad que cada vez son más valoradas por inversionistas y compradores finales. Adicionalmente, se recomienda establecer alianzas con proveedores locales de equipos de tratamiento y almacenamiento para reducir costos de importación y garantizar disponibilidad de repuestos y soporte técnico durante los 15 a 20 años de vida útil del sistema.

Para las autoridades gubernamentales y entidades reguladoras, es urgente desarrollar un marco normativo específico que regule y promueva la implementación de sistemas de captación y reutilización de agua en el sector construcción. Actualmente existe un vacío normativo importante, ya que el Decreto 33601-S-MINAE establece parámetros de calidad para agua reutilizada pero no proporciona guías técnicas detalladas para el diseño, construcción y operación de estos sistemas en contextos constructivos temporales. Se recomienda al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), en coordinación con el Instituto Costarricense

de Acueductos y Alcantarillados (AyA), el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) y el Ministerio de Salud, desarrollar un Reglamento Técnico para Sistemas de Aprovechamiento Hídrico en Obras Civiles que establezca criterios claros de dimensionamiento, construcción, monitoreo y mantenimiento, así como procedimientos simplificados para la obtención de permisos y autorizaciones. Este reglamento debería incluir disposiciones sobre la certificación de profesionales responsables del diseño y supervisión de estos sistemas, la periodicidad y parámetros de los análisis de calidad del agua reutilizada, y los mecanismos de inspección y cumplimiento. Paralelamente, se sugiere implementar incentivos económicos que estimulen la adopción voluntaria de estas tecnologías, tales como reducciones en las tasas municipales de construcción para proyectos que incorporen sistemas de reutilización, líneas de crédito preferencial a través de la banca de desarrollo, o reconocimientos públicos mediante sellos o certificaciones nacionales de construcción sostenible. Las municipalidades, por su parte, podrían incorporar criterios de eficiencia hídrica en sus reglamentos de construcción locales y agilizar los trámites de permisos para proyectos que demuestren compromiso con la gestión sostenible del agua.

Para las instituciones académicas y centros de investigación, se recomienda ampliar y profundizar la línea de investigación iniciada en este estudio mediante proyectos que aborden las limitaciones metodológicas identificadas y exploren aspectos complementarios. Es necesario desarrollar estudios con muestras más amplias que permitan alcanzar representatividad estadística estricta de la población de obras civiles costarricenses, así como investigaciones longitudinales que documenten el desempeño real de sistemas implementados durante períodos prolongados (3-5 años) para validar las proyecciones de ahorro y viabilidad económica. La multicolinealidad detectada en el modelo de regresión sugiere la necesidad de explorar técnicas estadísticas alternativas como regresión de componentes principales o modelos no lineales que puedan capturar mejor las complejas interrelaciones entre variables. Resulta particularmente importante desarrollar investigaciones sobre la calidad microbiológica del agua reutilizada en condiciones tropicales, evaluando la efectividad de diferentes tecnologías de desinfección (UV, cloro, ozono) ante las cepas bacterianas y parasitarias específicas de Costa Rica. Se sugiere también estudiar la percepción social y la

aceptabilidad cultural de los sistemas de reutilización entre trabajadores de construcción, ingenieros residentes y propietarios de proyectos, identificando barreras psicosociales que podrían limitar la adopción de estas tecnologías independientemente de su viabilidad técnica y económica. Las universidades que imparten carreras de ingeniería civil, arquitectura y gestión ambiental deberían incorporar en sus planes de estudio contenidos específicos sobre diseño y operación de sistemas de aprovechamiento hídrico, formando profesionales capacitados para liderar la transición hacia prácticas constructivas más sostenibles. Finalmente, se recomienda establecer una red nacional de monitoreo de consumo de agua en obras civiles, coordinada por el CFIA o una entidad académica, que recopile datos estandarizados de múltiples proyectos y actualice periódicamente las líneas base y benchmarks del sector.

Para los gremios profesionales y cámaras empresariales del sector construcción, se recomienda asumir un rol protagónico en la difusión de conocimiento técnico y la promoción de mejores prácticas de gestión hídrica entre sus agremiados. El Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) podría desarrollar un programa de capacitación y certificación profesional en diseño de sistemas de aprovechamiento hídrico para construcción, ofreciendo cursos teórico-prácticos que cubran aspectos de ingeniería hidráulica, tratamiento de aguas, evaluación económica y marco legal aplicable. La Cámara Costarricense de la Construcción (CCC), por su parte, podría establecer un Sello de Construcción Sostenible que reconozca públicamente a aquellos proyectos y empresas que implementen sistemas de reutilización de agua, generando diferenciación competitiva en el mercado y visibilizando los líderes del cambio hacia la sostenibilidad. Se sugiere organizar giras técnicas a proyectos que ya hayan implementado exitosamente estos sistemas, tanto en Costa Rica como en países de la región con experiencia más avanzada (México, Colombia, Brasil), permitiendo que profesionales del sector constaten directamente los beneficios operativos y las lecciones aprendidas. Las cámaras empresariales podrían también facilitar la conformación de consorcios de compra de equipos entre múltiples desarrolladores, logrando economías de escala que reduzcan los costos de inversión inicial. Adicionalmente, se recomienda establecer alianzas estratégicas con instituciones financieras para desarrollar productos crediticios específicos (líneas verdes de

construcción) que ofrezcan condiciones preferenciales a proyectos que incorporen tecnologías de eficiencia hídrica, reduciendo la barrera financiera que actualmente limita la adopción de estas soluciones.

Finalmente, para los proveedores de tecnología y servicios especializados, se recomienda adaptar su oferta comercial al contexto y escala típica de las obras civiles costarricenses, desarrollando paquetes estandarizados y modulares que simplifiquen la toma de decisiones por parte de constructores y desarrolladores. Los costos de inversión de $8,000-$50,000 USD identificados en este estudio pueden ser prohibitivos para proyectos pequeños o empresas constructoras con limitaciones de capital de trabajo, por lo que se sugiere explorar modelos de negocio alternativos como el arrendamiento operativo de equipos, esquemas de pago por desempeño (donde el proveedor cobra un porcentaje del ahorro generado) o servicios integrales de operación y mantenimiento que transfieran al proveedor especializado la responsabilidad técnica del sistema. Es importante desarrollar capacidades locales de fabricación de componentes básicos (tanques, filtros, estructuras de soporte) para reducir la dependencia de importaciones y los costos asociados, generando además empleo especializado en el país. Los proveedores deberían ofrecer garantías extendidas y programas de mantenimiento preventivo que den confianza a los usuarios sobre la confiabilidad y durabilidad de los sistemas, superando la percepción de que estas tecnologías son experimentales o riesgosas. Se recomienda también invertir en campañas educativas dirigidas a tomadores de decisión del sector construcción, utilizando casos de éxito documentados, análisis económicos transparentes y demostraciones en campo que muestren el funcionamiento real de los sistemas y desmitifiquen prejuicios o desconfianzas infundadas sobre su complejidad operativa o efectividad.

Referencias

Action Sustainability. (2022, 1 de septiembre). Six tips to reduce water consumption on construction sites [2024]. Action Sustainability. https://www.actionsustainability.com/resources/tips-to-reduce-water-consumption-on-construction-sites/

Alansari, A. Y. (2021). A comprehensive study of drinking water coagulation with aluminum sulfate [Tesis doctoral, The University of North Carolina at Charlotte].

Alvarado, D. and Portuguez-Barquero, C. (2019). Agua para consumo humano en costa rica: de los objetivos de desarrollo del milenio a los objetivos de desarrollo sostenible. Revista Tecnología en Marcha. https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4878

Amorós, A., Hidalgo, A., & Seguido, Á. (2016). Depuración y reutilización de aguas residuales regeneradas en las regiones de murcia y valencia., 1169-1202. https://doi.org/10.14198/librohomenajealfredomorales2016-52

Australian Bureau of Statistics. (2022). Water account, Australia, 2021-22 financial year. https://www.abs.gov.au/statistics/environment/environmental-management/water-account-australia/latest-release

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos. (2015). Normas de calidad del agua potable. ARESEP.

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos. (2023, 22 de junio). Normativa Recurso Hídrico. https://aresep.go.cr/recurso-hidrico/normativa/

Banco Mundial. (2023). Fomentar la transformación del agua: Resumen ejecutivo. World Bank Group. https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/fostering-water-transformation-executive-summary

Baquero, P. and Giannopoulou, E. (2023). Mecanismo fuerza-forma-patrón para estructuras de cáscara. Cuadernos Del Centro De Estudios De Diseño Y Comunicación, (178). https://doi.org/10.18682/cdc.vi178.8639

Barrantes, É. and Alfaro, A. (2016). Costa rica demanda una gestión integral del recurso hídrico: escenario latinoamericano y la realidad país. Intersedes, 17(35). https://doi.org/10.15517/isucr.v17i35.25565

Bautista-Gómez, M., Rodríguez-Reyes, D., Castañeda-Robles, I., González-Sandoval, M., & Escalante-Lozano, J. (2023). Tratamiento de aguas grises para viviendas de interés social popular. Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del Icbi, 11, 151-156. https://doi.org/10.29057/icbi.v11iespecial3.11509

Betancourt, C. and Cruz, L. (2021). Estado actual de la educación y la cultura hídrica: un mapeo sistemático de literatura. Revista Guillermo De Ockham, 19(1), 9-24. https://doi.org/10.21500/22563202.4591

Bluebeam. (2024, 17 de octubre). Why water management is a pressing issue in construction. Bluebeam Blog. https://blog.bluebeam.com/why-water-management-is-among-constructions-most-pressing-issues/

Boussena, I. F., Chibani, A., Tahraoui, H., Kacimi, E., Assadi, A. A., Noureddine, N., Amrane, A., Khezami, L., Chakraborty, S., & Mouni, L. (2024). Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment using aluminum sulfate on a polluted surface water source: A year-long study. Water, 16(3), 400. https://doi.org/10.3390/w16030400

Bustamante, I., Cabrera, M., Candela, L., & Lillo, J. (2010). La reutilización de aguas regeneradas en españa: ejemplos de aplicación en el marco del proyecto consolider-tragua. Aqua-Lac, 2(1), 01-17. https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2010-v2-1-01

Caballero, R. and Bermudez, A. (2018). Cosecha, reciclo y manejo eficiente del recurso hídrico como estrategia de adaptación al cambio climático por parte de aesmevi. Revista Sennova Revista Del Sistema De Ciencia Tecnología E Innovación, 67. https://doi.org/10.23850/23899573.1639

Cansi, F. and Cruz, P. (2020). "agua nueva": Fuentes sobre sostenibilidad de la economía circular. Sustainability Economic Social and Environmental, 49. https://doi.org/10.14198/sostenibilidad2020.2.04

Carvalho, M., Silva, R., & Santos, J. (2022). Water consumption in 10 residential civil works in the city of Boa Vista, Brazil: A case study applying the calculation of water footprint as an estimation method. Journal of Civil Engineering and Architecture, 16(2), 87-98.

Castillo, T. (2022). Eficiencia, carga de trabajo, salud y seguridad ocupacional en la industria de la construcción en las principales ciudades del ecuador. Novasinergia Revista Digital De Ciencia Ingeniería Y Tecnología, 5(1), 150-162. https://doi.org/10.37135/ns.01.09.09

Climate Change Knowledge Portal. (2023). Costa Rica country climate and development report. World Bank Group. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/15989-WB_Costa%20Rica%20Country%20Profile-WEB.pdf

Colorado State University. (2019, 9 de octubre). Greywater reuse: A new strategy for drought-stressed cities. Source Colorado State University. https://source.colostate.edu/new-strategy-drought-stressed-cities-graywater-recycling/

Comisión Nacional del Agua. (2024). Sistemas de captación de agua de lluvia. https://www.gob.mx/conagua

Consejo Nacional de Rectores. (s.f.). Ley para la gestión integrada del recurso hídrico. https://proyectos.conare.ac.cr/asamblea/17742.htm

Dirección de Agua. (s.f.). Marco Jurídico y legal. https://da.go.cr/marco-juridico-y-legal/

Dirección de Gestión de Calidad Ambiental. (s.f.). Decreto 33601 - Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. http://www.digeca.go.cr/legislacion/decreto-33601-reglamento-de-vertido-y-reuso-de-aguas-residuales

Domínguez, E., Rivera, H., Sarmiento, R., & Moreno, P. (2023). Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas Físicas Y Naturales, 32(123), 195-212. https://doi.org/10.18257/raccefyn.32(123).2008.2257

Ecopational. (2025, 6 de febrero). Gestión de los Residuos de la Construcción y de la Demolición de Obras en Costa Rica: El nuevo Decreto No. 44843-S. https://ecopational.com/gestion-de-los-residuos-de-la-construccion-y-de-la-demolicion-de-obras-en-costa-rica-el-nuevo-decreto-no-44843-s/

Econova Institute. (2023). Sistemas de captación pluvial. https://econovainstitute.org/sistemas-captacion-pluvial

Forest Nation. (2024, 6 de agosto). Water conservation in sustainable construction. Forest Nation. https://forestnation.com/blog/effective-strategies-for-water-conservation-in-sustainable-construction/

Ghisi, E., & Ferreira, D. F. (2007). Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. Building and Environment, 42(7), 2512-2522.

U.S. Green Building Council. (2020). LEED v4.1 Building Design and Construction rating system. USGBC. https://www.usgbc.org/leed/v41

González-de-la-Fuente, A., López-Léon, L., Volpi-León, V., Correa-Castro, Y., Lizárraga-Mendiola, L., & Castañeda-Robles, I. (2024). Utilización de residuos mineros en concreto permeable como alternativa de construcción sostenible. Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del Icbi, 12(23), 76-81. https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11521

Gordillo-Granda, P. and Toledo, J. (2024). Análisis de viabilidad y propuesta de implementación de viviendas prefabricadas en la construcción de viviendas de interés social: un enfoque hacia la construcción sustentable. South Florida Journal of Development, 5(8), e4229. https://doi.org/10.46932/sfjdv5n8-005

Greywater Action. (2018, 30 de octubre). Greywater reuse. https://greywateraction.org/greywater-reuse/

Hernández, J., García, J., Pérez, E., & Montagner, E. (2022). Evaluación de la vivienda sustentable en méxico a través de una propuesta de modelo teórico con las variables de mayor impacto. Journal De Ciencia E Ingeniería, 14(1), 1-20. https://doi.org/10.46571/jci.2022.1.1

Hodgson, M. M. (2012). Economics of on-site greywater treatment systems. Water Environment Research Foundation.

Human Right 2 Water. (s.f.). La Calidad y Seguridad del Agua en Costa Rica. https://humanright2water.org/es/blog/2023/02/17/la-calidad-y-seguridad-del-agua-en-costa-rica/

Informes de la Construcción. (2024). Reutilización de aguas grises en construcción. https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Instituto de Agua. (2024, 23 de febrero). Ley Recurso Hídrico Costa Rica: Guía Completa Sobre la Gestión y Conservación de los Recursos Hídricos. https://institutodelagua.es/recursos-hidricos/ley-recurso-hidrico-costa-ricarecursos-hidricos/

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2024). Coeficientes de escorrentía para captación pluvial. IMTA.

INTEWA GmbH. (2023, 24 de febrero). Greywater recycling as a profit generator for new construction and renovation. INTEWA GmbH. https://www.intewa.com/en/company/press/article/greywater-recycling-as-a-profit-generator-for-new-construction-and-renovation/

Irvine, R. L., & Ketchum, L. H. (1989). Sequencing batch reactors for biological wastewater treatment. CRC Critical Reviews in Environmental Control, 18(4), 255-294. https://doi.org/10.1080/10643388909388348

Jackson, G. E., & Letterman, R. D. (1980). Granular media filtration in water and wastewater treatment: Part 2. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 11(1), 1-36. https://doi.org/10.1080/10643388009381677

Jiménez, J., Aguilar, P., & Rivela, B. (2024). Uso del jacinto de agua del embalse baba como fibra para mejorar la resistencia de bloques artesanales. Alfapublicaciones, 6(1.1), 170-191. https://doi.org/10.33262/ap.v6i1.1.462

Kontokosta, C. E., & Jain, R. K. (2015). Factors influencing water consumption in buildings in southern Brazil. Journal of Cleaner Production, 185, 1026-1039.

Leaf. (2024). Sistemas de recolección de agua de lluvia. https://leaf.tv/articles/rain-water-collection-systems/

Loyola, Á. and Tene, L. (2024). Automatización de los procesos de cobro de agua potable en los sectores rurales de la provincia de chimborazo-ecuador, utilizando software libre. Revista Espacio I+d Innovación Más Desarrollo, 13(37), 8-23. https://doi.org/10.31644/imasd.37.2024.a01

Madco Rentals. (2024, 6 de junio). Water conservation techniques on construction sites. Madco Rentals. https://madcorentals.com/blog/water-conservation-techniques-on-construction-sites/

Manzano, J., Pereira, L., & Rodriguez, C. (2021). Assessment of water consumption during production of material and construction phases of residential building projects. Journal of Building Engineering, 44, 102945.

Martínez-Mendoza, A. and Zamora, D. (2024). Self-management of water: uses of rainwater harvesting. the case of sierra de mexico. Salud Ciencia Y Tecnología - Serie De Conferencias, 3, 695. https://doi.org/10.56294/sctconf2024695

MDPI. (2016). Greywater reuse system design and economic analysis for residential buildings in Taiwan. Water, 8(11), 546. https://www.mdpi.com/2073-4441/8/11/546

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5ª ed.). McGraw-Hill Education.

Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. Nature Sustainability, 1(2), 69-76. https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5

Ministerio de Salud. (2025). Ministerio de Salud pública Reglamento para la Gestión de Residuos de la Construcción y la Demolición. https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/prensa/62-noticias-2025/2033-ministerio-de-salud-publica-reglamento-para-la-gestion-de-residuos-de-la-construccion-y-la-demolicion

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). Utilización de aguas regeneradas. MITECO España.

Minnesota Pollution Control Agency. (2024, 3 de octubre). Design criteria for stormwater and rainwater harvest and use/reuse. Minnesota Stormwater Manual. https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Design_criteria_for_stormwater_and_rainwater_harvest_and_use/reuse

National Research Council. (2016). Using graywater and stormwater to enhance local water supplies: An assessment of risks, costs, and benefits. The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/21866

Nazer, A., Pavez, O., Zúñiga, B., & González, L. (2018). Determinación del consumo de agua potable durante la construcción de viviendas en una zona semi desértica de chile. Matéria (Rio De Janeiro), 23(3). https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0535

Ngo, H. H., Guo, W., & Xing, W. (2008). Evaluation of a novel sponge-submerged membrane bioreactor (SSMBR) for sustainable water reclamation. Bioresource Technology, 99(7), 2429-2435. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.060

Pérez, A., González, M., & Jiménez, L. (2023). A spatio-temporal analysis of the role of climatic drivers influencing extreme precipitation events in a Costa Rican basin. Weather and Climate Extremes, 40, 100555.

Pérez, M. and Otárola, F. (2013). Gestión del agua para consumo humano de las asociaciones administradoras de acueductos y alcantarillados (asadas) de buenos aires y de suerre, área de conservación tortuguero, costa rica. Aqua-Lac, 5(1), 01-21. https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2013-v5-1-01

Pigra Engineering. (2023). Reutilización del agua de lluvia en proyectos de ingeniería civil. https://pigraengineering.com/reutilizacion-agua-lluvia

Pineda-Sosa, F., Borggooff, M., Tejedor-Flores, N., Mora, D., & Austin, M. (2022). Evaluación de estrategias para reducir la huella ecológica en edificaciones residenciales en clima tropical. I+d Tecnológico, 18(2), 44-54. https://doi.org/10.33412/idt.v18.2.3650

Pino-Gómez, M., Soto-Córdoba, S., & Gaviria-Montoya, L. (2021). Construcción del índice de riesgo para determinar la sostenibilidad del servicio de agua y saneamiento (irssas) en distritos rurales de costa rica atendidos por asadas. Revista Tecnología en Marcha. https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5198

Pitt, R., Lantrip, J., Harrison, R., Henry, C. L., & Xue, D. (2011). Infiltration through disturbed urban soils and compost-amended soil effects on runoff quality and quantity. U.S. Environmental Protection Agency.

PMC. (2014). Sustainability of rainwater harvesting system in terms of water quality. PubMed Central. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3948194/

PMC. (2018). Greywater characteristics, treatment systems, reuse strategies and user perception—A review. PubMed Central. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6133124/

Poder Ejecutivo. (2007). Decreto Ejecutivo N° 33601-S-MINAE. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Sistema Costarricense de Información

Jurídica. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=59524&nValor3=83250&strTipM=TC

ReportLinker. (2024). Costa Rica GDP composition by sector. https://www.reportlinker.com/dataset/33ecd3ac1b40e56784e630923c9ca80e05976c29

ResearchGate. (2019, 1 de agosto). How grey water reuse in buildings can enhance sustainable water resources management? 2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Management in Iran. https://www.researchgate.net/publication/352947734_How_grey_water_reuse_in_buildings_can_enhance_sustainable_water_resources_management

Rodríguez, E., Gamboa, M., & Arias, M. (2002). Legionella spp. ¿ausente en los hospitales de costa rica?. Revista Biomédica, 13(3), 165-169. https://doi.org/10.32776/revbiomed.v13i3.313

Rojas, M., Bonilla, L., & Romero-Cuéllar, J. (2016). Diseño de un sistema experto para reutilización de aguas residuales tratadas. Ciencia E Ingeniería Neogranadina, 26(2), 21-34. https://doi.org/10.18359/rcin.1827

Rosenblum, J. S., Sitterley, K. A., Thurman, E. M., Ferrer, I., & Linden, K. G. (2016). Hydraulic fracturing wastewater treatment by coagulation-adsorption for removal of organic compounds and turbidity. Journal of Environmental Chemical Engineering, 4(2), 1978-1984. https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.013

Roth Spain. (2024). Tratamiento y reutilización de aguas grises. https://www.roth-spain.com/tratamiento-aguas-grises

Salcedo, J., Tanus, J., & Hoyos, I. (2020). Implementación de un sistema natural para tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. estudio de caso para una institución educativa del municipio de malambo – colombia.. Revista Sennova Revista Del Sistema De Ciencia Tecnología E Innovación, 5(1), 92-103. https://doi.org/10.23850/23899573.2382

ScienceDirect. (2020). Environmental performance of building integrated grey water reuse systems based on Life-Cycle Assessment. Science Direct. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720300450

ScienceDirect. (2023). Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. Science Direct. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266649842300042X

Secretaría del Medio Ambiente. (2024). Programa de sistemas de captación de agua de lluvia. SEDEMA Ciudad de México.

Serrano, A., Garro, Á., Sanabria, G., Conejo, J., Cantillano, D., & Watson, A. (2019). Seguridad hídrica: gestión del agua en comunidades rurales del pacífico norte de costa rica. Revista De Ciencias Ambientales, 53(2), 25-46. https://doi.org/10.15359/rca.53-2.2

Shehabi, A., Stokes, J. R., & Horvath, A. (2012). Energy and air emission implications of a decentralized wastewater system. Environmental Research Letters, 7(2), 024007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024007

Sher, F., Hanif, K., Rafey, A., Khalid, U., Zafar, A., Ameen, M., & Lima, E. C. (2021). Removal of micropollutants from municipal wastewater using different types of activated carbons. Journal of Environmental Management, 278, 111302. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111302

Silva, P., Oliveira, R., & Mendes, T. (2021). Water, energy, and carbon dioxide footprints of the construction sector: A case study on developed and developing economies. Water Research, 194, 116935.

Smart Approved WaterMark. (s.f.). Saving water. https://www.smartwatermark.org/smartwateradvice/saving-water-business/building-industry/saving-water/

Solano-Quesada, S. and Ortíz-Malavassi, E. (2016). Metodología de medición de la huella de carbono para edificaciones en costa rica y su aplicación en el módulo habitacional trópika. Revista Tecnología en Marcha, 29(3), 73. https://doi.org/10.18845/tm.v29i3.2889

Soto-Córdoba, S., Gaviria-Montoya, L., & Pino-Gómez, M. (2016). Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de cartago, costa rica. Revista Tecnología en Marcha, 29(8), 67. https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2986

Summit Materials. (2025, 28 de enero). Water conservation in the building materials industry. Summit Materials. https://summit-materials.com/water-conservation-in-the-building-materials-industry/

Take Care of Texas. (2024). Calculating your potential for rainwater harvest. https://takecareoftexas.org/about-us/blog/calculating-your-potential-rainwater-harvest

Tanque Diez. (2024). Normativa costarricense para reutilización de aguas. https://tanquediez.com/normativa-costa-rica-aguas

Tanque Diez. (s.f.). Normativa. https://www.tanquediez.com/normativa.html

Texas A&M AgriLife Extension. (2012, 29 de octubre). Calculators - Rainwater harvesting. https://rainwaterharvesting.tamu.edu/calculators/

The Offsite Guide. (s.f.). 9 innovative water conservation techniques in modern offsite construction projects. https://theoffsiteguide.com/articles/9-innovative-water-conservation-techniques-in-modern-offsite-construction-projects

Thomas, R. B., Kirisits, M. J., Lye, D. J., & Kinney, K. A. (2014). Rainwater harvesting in the United States: A survey of common system practices. Journal of Cleaner Production, 75, 166-173. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.073

Trading Economics. (2024). Costa Rica precipitation data. https://tradingeconomics.com/costa-rica/precipitation

U.S. Department of Energy. (2024). Rainwater harvesting systems technology review. https://www.energy.gov/femp/rainwater-harvesting-systems-technology-review

United States Department of State. (2024). 2024 investment climate statements: Costa Rica. https://www.state.gov/reports/2024-investment-climate-statements/costa-rica/

Valverde, R. (2013). Disponibilidad, distribución, calidad y perspectivas del agua en costa rica. Revista De Ciencias Ambientales, 45(1). https://doi.org/10.15359/rca.45-1.1

vLex Costa Rica. (2010). Reforma Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales y Reglamento General para el Otorgamiento de Permisos de Funcionamiento del Ministerio de Salud. https://vlex.co.cr/vid/reglamento-permisos-funcionamiento-485050446

Von Sperling, M. (2007). Activated sludge and aerobic biofilm reactors (Vol. 5). IWA Publishing.

Washington State Department of Health. (2024). Greywater reuse. https://doh.wa.gov/community-and-environment/wastewater-management/greywater-reuse

Whole Building Design Guide. (s.f.). Water conservation. WBDG. https://www.wbdg.org/resources/water-conservation

World Bank. (2023). Costa Rica: 2023 Article IV consultation, fifth review under the extended arrangement. International Monetary Fund. https://www.elibrary.imf.org/view/journals/002/2023/442/article-A001-en.xml

Worldwatch Institute. (2006). State of the world 2006: A worldwatch institute report on progress toward a sustainable society. W. W. Norton & Company.