

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER ICCP COOPERACIÓN SENEGAL

Análisis y propuesta de alternativas de saneamiento descentralizado en zonas rurales de Kedougou: implicaciones técnicas, socioeconómicas y ambientales.

Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño

Máster universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Javier Rojas Santiago

Dirigido por:

María José Rodríguez Largacha, María Olga Bernaldo Pérez y Pedro Gerardo Blázquez García

Madrid, 2026

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer, por lo especial del TFM, y el trasfondo que conlleva, a los implicados en facilitar que haya podido tener esta experiencia: la Universidad Europea de Madrid, el Colegio Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, la Fundación ACS y, sobre todo, a todas las personas con las que he trabajado en Yakaar África, por la inspiración a nivel personal que esta experiencia, a nivel personal ha resultado ser. *Ndanka ndanka, la prisa mata.*

Agradecer también a Ana Galán la confianza y la flexibilidad que me permitieron vivirlo, y a mis tutores María José, Olga y Pedro por guiarme en el camino.

Y, por supuesto, a mi familia, que siempre me ha impulsado y motivado a conseguir mis metas, educándome en estos valores de los que hoy me siento tan orgulloso.

Índice

Agradecimientos	2
Índice de figuras	5
Índice de tablas	6
1. Antecedentes	1
1.1. Contexto cultural y socioeconómico de Senegal	1
1.1.1. Demografía	2
1.1.2. Educación	4
1.1.3. Economía	5
1.2. Contexto cultural y socioeconómico de Kedougou	6
1.2.1. Demografía	6
1.2.2. Educación	8
1.2.3. Economía	9
1.3. Marco climático e hidrológico en la región de Kedougou	11
1.3.1. Marco climático	11
1.3.2. Marco hidrológico	12
1.4. Implicaciones del contexto socioeconómico en el acceso al agua en zonas rurales 15	
1.4.1. Abastecimiento	15
1.4.2. Saneamiento	17
2. Objetivos	18
2.1. Objetivo general	18
2.2. Objetivos específicos	19
3. Metodología	20
3.1. Fases del trabajo	20
3.1.1. Fase 1. Caracterización del área de estudio	20
3.1.2. Fase 2. Revisión del estado del arte	21
3.1.3. Fase 3. Análisis comparativo y selección de tecnología	22
3.1.4. Fase 4. Desarrollo del caso de estudio	22
3.2. Herramientas y fuentes utilizadas	23
3.2.1. Fuentes estadísticas y demográficas	23
3.2.2. Fuentes climáticas e hidrológicas	24
3.2.3. Referencias técnicas de saneamiento	24
3.2.4. Herramientas de elaboración y análisis	25
3.3. Criterios de evaluación	25
3.3.1. Dimensión 1. Condicionantes físicos del emplazamiento	26

3.3.2.	Dimensión 2. Aspectos sanitarios	26
3.3.3.	Dimensión 3. Aspectos constructivos y costes	26
3.3.4.	Dimensión 4. Sostenibilidad ambiental	27
3.3.5.	Dimensión 5. Factores sociales e institucionales.....	27
3.4.	Método de comparación.....	27
3.4.1.	Estructura de la matriz.....	27
3.4.2.	Sistema de valoración.....	28
3.4.3.	Ausencia de ponderación numérica	28
3.4.4.	Limitaciones del método	29
4.	Alternativas de saneamiento descentralizado.....	29
4.1.	Saneamiento rural en países de renta baja	29
4.1.1.	Acceso al saneamiento y prácticas predominantes	30
4.1.2.	Relación entre saneamiento, salud y desarrollo.....	31
4.1.3.	Enfoques y estrategias en saneamiento rural.....	31
4.1.4.	Limitaciones técnicas y contextuales	32
4.1.5.	Saneamiento rural y sostenibilidad	32
4.2.	Soluciones de saneamiento en zonas rurales de renta baja	33
4.2.1.	Letrina de foso simple.....	34
4.2.2.	Letrina de foso mejorado y ventilado simple (VIP)	54
4.2.3.	Sistema seco de pozos gemelos.....	64
4.2.4.	Retrete basado en contenedores	74
4.3.	Evaluación multicriterio	87
5.	Resultados	88
5.1.	Selección del tipo de saneamiento para el caso de estudio: Sistema CBS	88
5.2.	Implementación del sistema CBS en la región de Kedougou	91
5.2.1.	Cadena de servicio del sistema CBS	92
5.2.2.	Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	109
6.	Conclusiones	112
6.1.	Limitaciones del estudio.....	113
6.2.	Reflexión personal.....	113
7.	Referencias bibliográficas.....	115

Índice de figuras

Figura 2 Mapa político de Senegal.....	1
Figura 3 Distribución de la población de Senegal por regiones.	2
Figura 4 Mapa de la región de Kedougou.	6
Figura 5 Vivienda de construcción estándar en la región de Kedougou.	7
Figura 6 Divisiones administrativas de la región con sus departamentos	8
Figura 7 Centro de educación primaria de Itato.	9
Figura 8 Temperaturas y precipitación mensual medias en Kedougou 1991-2020.	12
Figura 9 Mapa de recursos hídricos.....	13
Figura 10 Pozo raso manual en una de las concesiones de Itato.	15
Figura 11 Pozo de bombeo con depósito. Itato	16
Figura 12 Instalación fotovoltaica para bombeo. Itato.....	16
Figura 13 Esquema ilustrativo de letrina de foso simple.	34
Figura 14 Acabado superior de letrina tipo construida por Yakaar Africa. Itato.	43
Figura 15 Detalle de patología	47
Figura 16 Letrina inutilizada por rotura de solera. Itato.....	47
Figura 17 Esquema ilustrativo de letrina de foso simple.	55
Figura 18 Esquema ilustrativo de sistema seco de pozos gemelos. Letrina doble VIP y Fosa Alternativa	64
Figura 19 Esquema ilustrativo de sistema CBS	75
Figura 20 Diferencia porcentual del coste anual por hogar de servicio CBS comparado con otras formas de saneamiento.	83
Figura 21 Desglose de costes de construcción de letrinas. Ibel.....	88
Figura 22 Presencia global de empresas CBS.	91
Figura 23 Cadena de servicio del sistema CBS	92
Figura 24 Modelo de sistema CBS con separador de orina.	93
Figura 25 Trabajadores de la organización SOIL durante el vaciado de contenedores.	101
Figura 26 Huerto estudiantil impulsado por compost de SOIL.....	107

Índice de tablas

Tabla 1 Distribución de la población por edades.	2
Tabla 2 Distribución por regiones de la población de Senegal en 2024	4
Tabla 3 Sistema de colores utilizado en la matriz de análisis.....	28
Tabla 4 Especificaciones técnicas del modelo CBS propuesto.....	97

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Máster se aborda el análisis y la selección de soluciones de saneamiento adaptadas a contextos rurales de países en desarrollo, tomando como caso de estudio la región de Kedougou, en el sureste de Senegal. Durante el desplazamiento, acompañado por la asociación Yakaar África, se visitaron varios asentamientos pertenecientes a esta región. Durante la fase de trabajo de campo, se pudo apreciar una baja densidad de población, una elevada dispersión de los asentamientos y grandes limitaciones a la hora de poder proyectar infraestructuras de saneamiento convencionales, tanto a nivel económico como de contexto.

A partir de estas primeras impresiones, el estudio se centra en la evaluación de distintas alternativas de saneamiento descentralizado que puedan mitigar esta situación, entre las que se incluyen las letrinas de foso simple, las letrinas ventiladas mejoradas (VIP), dos sistemas secos de pozos gemelos y los sistemas basados en contenedores (CBS). En cada una de estas opciones podemos apreciar ventajas e inconvenientes. Para ello se tiene en cuenta factores como las condiciones hidrogeológicas, el coste de implementación, la facilidad de mantenimiento o la aceptación social por parte de la población local.

En los resultados obtenidos podemos apreciar que, aunque soluciones tradicionales como las letrinas de foso presentan facilidad logística inicial, su viabilidad se ve limitada por factores como la proximidad del nivel freático o el riesgo de contaminación de acuíferos, así como un coste de inversión inicial limitante en el contexto de Kedougou. Aquí es donde el sistema CBS emerge como una alternativa especialmente interesante, al permitir la recogida y el tratamiento controlado de las excretas sin necesidad de infiltración en el terreno, reduciendo así los riesgos sanitarios y ambientales, y favoreciendo la sostenibilidad y la economía circular.

Sin embargo, la implantación de este sistema implica grandes desafíos asociados a la regulación del sistema.. Al ser una tecnología relativamente innovadora, sin ningún precedente establecido en Senegal, hace necesario un análisis detallado de su viabilidad económica y operativa previo a su implementación. En este trabajo se propone un esquema de prefactibilidad adaptado a las condiciones locales, incluyendo consideraciones sobre la cadena de servicio, el dimensionamiento del sistema y su integración en un modelo de economía circular.

Se ha buscado adoptar enfoques integrales innovadores en el diseño de soluciones de saneamiento rural, que no solo tengan en cuenta los aspectos técnicos, sino también las condiciones sociales, económicas y culturales del entorno.

1.1.1. Demografía

Según el último estudio de la ANSD (Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie), publicado en el Censo General de Población y Vivienda, en francés “5e Recensement Général de la Population et de l’Habitat du Sénégal” (RGPH-5) en 2023, la población de Senegal contaba con 18.126.390 habitantes, con la distribución presentada en la *Figura 2 y Tabla 1*.

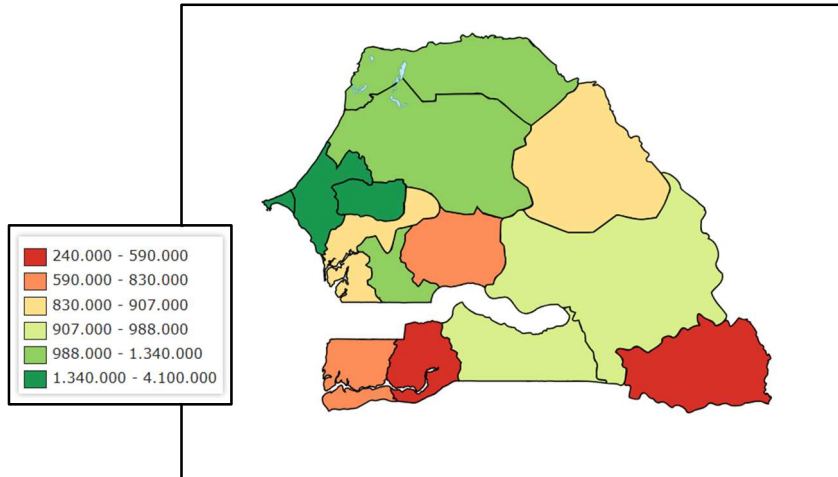


Figura 2 Distribución de la población de Senegal por regiones.

Fuente: RGPH-5, 2023.

País	Edad	Sexo	2023
Senegal	< 15 años	Masculino	3.725.315
		Femenino	3.365.813
		Total	7.091.128
	15 - 34 años	Masculino	3.212.348
		Femenino	3.274.930
		Total	6.487.287
	35 - 59 años	Masculino	1.719.211
		Femenino	1.748.252
		Total	3.467.463
	> 60 años	Masculino	522.021
		Femenino	558.501
		Total	1.080.522
Total	Masculino	9.178.895	
	Femenino	8.947.495	
	Total	18.126.390	

Tabla 1 Distribución de la población por edades.

Fuente: ANSD, 2023

La población de Senegal en 1976 era de 4.997.885. La tasa media de crecimiento anual varió entre el 2,5% y el 2,9% en el período 1976-2023, con un pequeño descenso del 2,7% al 2,5% entre los años 1988 y 2002, estabilizándose en un 2,9% finalmente durante el período 2013 – 2023.

La población senegalesa sigue creciendo rápidamente, gracias en gran parte a la disminución de la mortalidad, así como a una alta tasa de fecundidad. El índice sintético de fecundidad, definido como el número medio de hijos por mujer al término de su vida reproductiva, pasó de 6,4 hijos por mujer en 1986, según la Encuesta Demográfica y de Salud (EDS-1986), a 5,1 en 2013 (RGPHAE-2013). Esta reducción continuó hasta situarse en 4,7 hijos por mujer en 2019 (EDS-Continue 2019) y alcanzó los 4,2 hijos por mujer en 2023, de acuerdo con los resultados del quinto Censo General de Población y Vivienda (RGPH-5, 2023).

En relación con la mortalidad, los datos más recientes del censo señalan una tasa bruta de mortalidad de 5,6%. Asimismo, la esperanza de vida al nacer para un individuo nacido en 2023 se estima en 68,9 años, suponiendo que los patrones de mortalidad por edad observados en ese año permanezcan constantes.

Según datos obtenidos del RGPH - 5, la población residente total en Senegal en 2023 era de 18.126.390 habitantes, de los cuales un 50,6% eran hombres y un 49,4% mujeres, previéndose que se duplique en 25 años si continúa con el ritmo actual.

Se contabilizan tres tipos de subpoblaciones. La primera es la población que vive en hogares ordinarios, estimada en 17.683.038 individuos; la segunda es la que reside en hogares colectivos, que representa 431.473 habitantes; y la tercera es la población flotante, término que refiere a las personas que transitan o trabajan en un territorio sin tener su residencia oficial en él ni estar inscritas en su padrón, y que está constituida por 11.879 personas sin hogar o sin un domicilio fijo. La población de los hogares ordinarios está compuesta por un número mayor de mujeres que de hombres y es ligeramente más numerosa en la zona urbana. Por otra parte, en la población de los hogares colectivos se aprecia una mayoría masculina que también está más presente en el medio urbano. En cuanto a la población flotante, es también más frecuente en los centros urbanos, con una predominancia de hombres.

También podemos apreciar en los datos de la *Tabla 1* que la mitad de la población residente es menor de 19 años, siendo un 39% de la población total menores de 15 años, y el 75% menores de 35 años.

Respecto a la distribución demográfica, vemos que el 47% de la población se concentra en las regiones de Dakar, Thiès y Diourbel, principalmente en Dakar, donde aproximadamente un 22% de la población total del país reside en el 0,28% del territorio. Esto da lugar a una densidad de población de 7277 habitantes por km².

Región	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Población total	Peso (%)	Densidad de población por km ²	Población urbana
Dakar	535	0	4,080,503	22	7,627	4,080,503
Ziguinchor	7	4	628,865	3	86	348,246
Diourbel	4,860	3	2,143,275	12	441	1,433,798
Saint-Louis	19,010	10	1,230,598	7	65	582,925
Tambacounda	42,613	22	1,017,563	6	24	271,691
Kaolack	5,310	3	1,375,350	7	259	531,180
Thiès	6,586	3	2,524,516	14	383	1,464,422
Louga	25,619	13	1,155,703	6	45	315,189
Fatick	7,010	4	932,651	5	133	207,002
Kolda	13,752	7	941,511	5	69	344,966
Matam	28,830	15	855,290	5	30	276,162
Kaffrine	11,057	6	848,581	5	77	133,563
Kédougou	16,904	9	252,080	1	15	79,545
Sédhiou	7,353	4	606,772	3	83	137,745
Senegal	196,768	100	18,593,258	100	95	10,206,937

Tabla 2 Distribución por regiones de la población de Senegal en 2024

Fuente: ANSD. Informe sobre las proyecciones demográficas para 2023-2024.

1.1.2. Educación

Uno de los mayores retos en Senegal actualmente es la educación. Según los datos aportados por el RGPH-5, la tasa bruta de matriculación (TBM), que evalúa el acceso a la educación en cada nivel de educación, se sitúa alrededor del 18,2% para educación infantil, un 81,0% en primaria, 50,6% en secundaria y el 30,3% para bachillerato. El porcentaje disminuye drásticamente en todos los niveles cuando se trata de zonas rurales, así como una brecha entre géneros, que crece según aumenta el nivel educativo.

En educación infantil y educación primaria la participación femenina es similar o ligeramente inferior a la masculina. Aquí el problema principal es el bajo acceso general, especialmente en zonas rurales. La brecha empieza a hacerse claramente visible a partir de la educación secundaria, donde la TBM de las mujeres es ya sensiblemente inferior a la de los hombres. Esto se debe a factores como el abandono escolar temprano, matrimonios y embarazos precoces y

relegación a tareas domésticas, viéndose afectadas en mayor medida las adolescentes residentes en zonas rurales.

En resumen, aunque los valores globales son válidos para el conjunto de la población, ocultan una desigualdad estructural de género, particularmente visible en secundaria y bachillerato y en el ámbito rural. Esto es clave si se conecta educación con salud, fecundidad, saneamiento o desarrollo comunitario, porque la educación femenina tiene un efecto directo sobre todos ellos.

1.1.3. Economía

La estructura económica de Senegal presenta una fuerte dependencia del sector primario. El 44,5% de los hogares del país son de carácter agrícola, de los cuales aproximadamente dos tercios se localizan en zonas rurales. Esta elevada concentración de población en el medio rural condiciona de manera directa tanto la dinámica demográfica como las oportunidades de acceso a servicios básicos, entre ellos la educación.

Desde el punto de vista productivo, la economía rural senegalesa se caracteriza por prácticas de bajo nivel de técnico, con un claro predominio de la agricultura de secano y de la ganadería. Estas actividades son altamente dependientes de la variabilidad climática y con escaso valor añadido. La limitada presencia de actividades más intensivas o especializadas, como la horticultura o la pesca, refleja una reducida diversificación del medio rural, lo que se traduce en bajos ingresos y elevada vulnerabilidad económica de los hogares.

Este contexto económico tiene una incidencia directa sobre la situación demográfica y educativa del país. En los hogares agrícolas, especialmente en zonas rurales, la necesidad de mano de obra familiar favorece tasas elevadas de fecundidad y dificultan la permanencia de niños y jóvenes, y en particular de las niñas, en el sistema educativo más allá de la educación primaria. El limitado acceso a equipamiento agrícola moderno refuerza este círculo de pobreza estructural. Esta baja mecanización restringe la productividad, reduce la resiliencia frente al clima y limita la generación de excedentes económicos.

En conjunto, la combinación de una economía rural poco diversificada, la alta dependencia del sector primario y el acceso desigual a la educación contribuye a perpetuar la dinámica demográfica de Senega. Este marco estructural ayuda a comprender las dificultades del país en términos de desarrollo socioeconómico. Las soluciones han de abordar simultáneamente

educación, productividad agrícola, equidad de género y mejora de los servicios básicos en el medio rural.

1.2. Contexto cultural y socioeconómico de Kedougou

Kedougou es una región ubicada en el extremo sudeste de Senegal, compartiendo frontera con Mali y con Guinea y limitando con la región de Tambacounda al oeste y al norte.

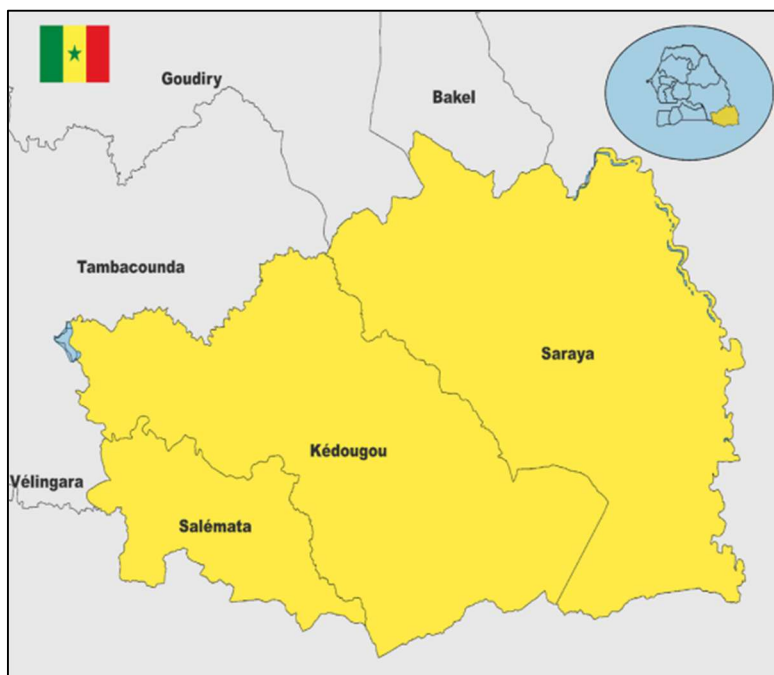


Figura 3 Mapa de la región de Kedougou.

Fuente: ANSD, (s.f.)

1.2.1. Demografía

La población de Senegal se distribuye de forma desigual en el territorio nacional, con importantes disparidades regionales. Kedougou es la región menos poblada, con 252.080 habitantes, lo que representa el 1,4 % de la población total de Senegal en 2024, siendo el 53,8% hombres y el 46,2% mujeres.

Siendo antiguamente parte de la región de Tambacounda, Kedougou se estableció como región independiente en 2008. Según los datos del censo del RGPH-5 en 2023, cuenta con una superficie de 16.896 km² y una densidad de población de 15 habitantes/km². La región está formada por 22 municipios, incluyendo 3 departamentos (Kedougou, Salémata y Saraya). El departamento de Kedougou, que abarca el 36,4% de la superficie de la región, siendo un total de 6.149 km²,

alberga a más de la mitad de la población (50,7%), con una densidad de población de 21 habitantes/km². Respecto a las subdivisiones administrativas locales, la región de Kedougou, según datos del RGPH-5 en 2023, se compone por 482 localidades, que incluyen 24 distritos, 277 aldeas y 181 localidades.

En términos de urbanización, la región cuenta con solo tres áreas urbanas, correspondientes a las capitales departamentales (Kédougou, Saraya y Salémata). Esta situación se traduce en una baja tasa de urbanización del 31,3 % en 2023, según los datos aportados por el RGPH-5.



Figura 4 Vivienda de construcción estándar en la región de Kedougou.

Fuente: Elaboración propia



Figura 5 Divisiones administrativas de la región con sus departamentos

Fuente: Servicio Regional de Estadística y Demografía de Kedougou

1.2.2. Educación

La situación educativa en la región de Kedougou refleja las desigualdades territoriales existentes entre las zonas urbanas y rurales de Senegal. El marcado carácter rural de la región, junto con su dispersión poblacional y el limitado desarrollo de infraestructuras, condiciona el acceso, la permanencia y la progresión de los jóvenes dentro del sistema educativo, particularmente en los niveles siguientes a la educación primaria.

Aunque en los últimos años se registra un aumento del número de centros de enseñanza media y secundaria, la oferta educativa sigue siendo insuficiente, especialmente en las comunidades rurales más alejadas. Las largas distancias entre los hogares y los centros educativos, unidas a la precariedad de las vías de comunicación, constituyen un obstáculo significativo para la escolarización.

En numerosos hogares rurales, los niños y adolescentes participan activamente en las actividades productivas y domésticas, lo que reduce el tiempo disponible para la asistencia escolar y afecta negativamente al rendimiento académico.

Esta situación resulta particularmente desfavorable para las niñas, cuya escolarización se ve condicionada por los factores anteriormente mencionados.

Las dificultades estructurales del sistema educativo en Kedougou contribuyen a perpetuar un círculo de baja cualificación, escasa diversificación económica y pobreza rural. En este contexto, el fortalecimiento de la educación en las zonas rurales, con especial atención a la permanencia en los ciclos medio y secundario y a la escolarización de las niñas, se considera un elemento clave para favorecer un desarrollo socioeconómico más sostenible en la región.



Figura 6 Centro de educación primaria de Itato.

Fuente: Elaboración propia

La educación es uno de los proyectos más ambiciosos de la asociación Yakaar África, que apuesta por la educación de los jóvenes de la región como motor de cambio de mentalidad y desarrollo en las zonas rurales, becando a los estudiantes para la realización de estudios universitarios en ciudades como Dakar o Saint Louis. Estas becas se otorgan con la “cláusula” de devolver esa inversión ayudando con las habilidades obtenidas al desarrollo de los pueblos de los que son originarios.

1.2.3. Economía

La región de Kedougou presenta una estructura económica marcadamente rural y poco diversificada, basada casi exclusivamente en el sector primario. La agricultura familiar y la ganadería extensiva constituyen los principales medios de subsistencia de la población, especialmente en las zonas rurales, donde se concentra la mayor parte de los hogares.

La actividad agrícola es predominantemente de secano y depende en gran medida del régimen de precipitaciones. A pesar de que Kedougou es una de las regiones más lluviosas del país, la

variabilidad interanual de las lluvias y la ausencia de sistemas de riego desarrollados limitan la estabilidad de los rendimientos y de los ingresos rurales. La escasa utilización de tecnologías agrícolas modernas refuerza un modelo de agricultura de subsistencia, con una capacidad reducida para generar excedentes comercializables.

La ganadería desempeña un papel complementario clave dentro del sistema productivo regional, actuando como una estrategia de diversificación y seguridad económica para los hogares rurales. Predominan sistemas extensivos, con baja productividad. Actividades como la avicultura presentan un potencial significativo para la generación de ingresos a pequeña escala, especialmente para mujeres y jóvenes.

Respecto a la infraestructura comercial, ésta se caracteriza por un número reducido de mercados permanentes y semanales, que forman los puntos de encuentro de distintos actores económicos locales y extranjeros, asistiendo personas procedentes de Guinea o Malí.

El tejido económico de la región se caracteriza además por un bajo nivel de formalización. La mayor parte de las actividades productivas y comerciales se desarrollan de manera informal. Según el SES (Situaciones Económicas y Sociales Regionales) aportado por los Servicios Regionales de Estadística y Demografía en 2024, entre 2023 y 2024, no se registra un aumento en el número de comerciantes. Los minoristas dominan el sector del comercio local, representando el 97,8% del total de comerciantes, mientras que los mayoristas representan únicamente el 0,6% del efectivo total. Esta situación se traduce en una reducida base fiscal local, limitando la capacidad para invertir en infraestructuras económicas, servicios básicos y equipamientos colectivos.

El aislamiento geográfico de la región, junto con una infraestructura de transporte deficiente y , dificulta la integración de Kedougou en los circuitos económicos nacionales.

La economía de Kedougou se enfrenta a importantes desafíos estructurales derivados de su dependencia del sector primario, la baja productividad, la escasa diversificación económica y la limitada capacidad de inversión pública. Estas características condicionan el desarrollo socioeconómico de la región y explican la persistencia de elevados niveles de pobreza rural.

1.3. Marco climático e hidrológico en la región de Kedougou

1.3.1. Marco climático

El régimen climático de la región de Kedougou se establece con una alternancia muy diferenciada entre dos grandes períodos: la estación seca y la estación lluviosa, determinada por la entrada del monzón de África Occidental. Esto condiciona de manera estructural las condiciones de vida de la población, los recursos hídricos disponibles y las prácticas de abastecimiento y saneamiento en el territorio.

Según los datos obtenidos en el Boletín Climático Estacional JFM del ANACIM (Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie) en 2021, considerada la autoridad meteorológica nacional competente, durante el trimestre formado por los meses de enero, febrero y marzo (JFM), que constituyen el núcleo de la estación seca, la región de Kedougou queda bajo la influencia del anticiclón de las Azores. Este anticiclón genera un flujo de vientos con velocidades medias estacionales inferiores a 5,5 m/s a nivel de superficie, configuración atmosférica característica del régimen de Harmattan. El Harmattan es un viento alisio del noroeste, seco y polvoriento, que sopla desde el Sahara hacia el Golfo de Guinea, principalmente entre finales de noviembre y principios de marzo. Por esto, Kedougou se posiciona como una de las zonas de mayor intensidad térmica del país.

Según los datos de la estación meteorológica de Kedougou registrados en el Boletín Climático Estacional JFM 2021, la temperatura máxima absoluta registrada durante ese trimestre alcanzó los 43,5 °C, mientras que la temperatura máxima más baja del período se situó en 33,8 °C.

La estación lluviosa, que se extiende durante el trimestre formado por los meses de julio, agosto y septiembre (JAS) como período de máxima intensidad, responde a la entrada del monzón (ANACIM, 2021). Durante este período, la actividad convectiva abarca todo el territorio senegalés, siendo especialmente intensa en la mitad sur del país, donde se ubica Kedougou. Los datos de extremos climáticos de la estación de Kedougou para el trimestre JAS 2021 registran una temperatura máxima absoluta de 42,3 °C y una temperatura mínima de 20,7 °C con una precipitación diaria máxima de 73,3 mm (ANACIM, 2021).

La conclusión que podemos obtener de ambos boletines del ANACIM permite concluir que la región de Kedougou presenta un perfil climático de altas temperaturas a lo largo de todo el año con temperaturas máximas absolutas que oscilan entre los 42,3 °C en la estación lluviosa y los 43,5 °C en la estación seca. Esto se combina con una pluviometría concentrada e irregular que contrasta con una aridez extrema durante los siete meses de estación seca. Como solo se reportan los boletines estacionales anuales en la página oficial del ANACIM, se consideró oportuno contrastar estos datos con series históricas largas de otras fuentes oficiales como el Climate Knowledge Portal del Banco Mundial y fuentes secundarias como Climates to Travel, llegando a la conclusión de que los datos registrados por ANACIM en 2021 son plenamente coherentes con las series históricas largas en lo relativo a temperaturas, estacionalidad y humedad.

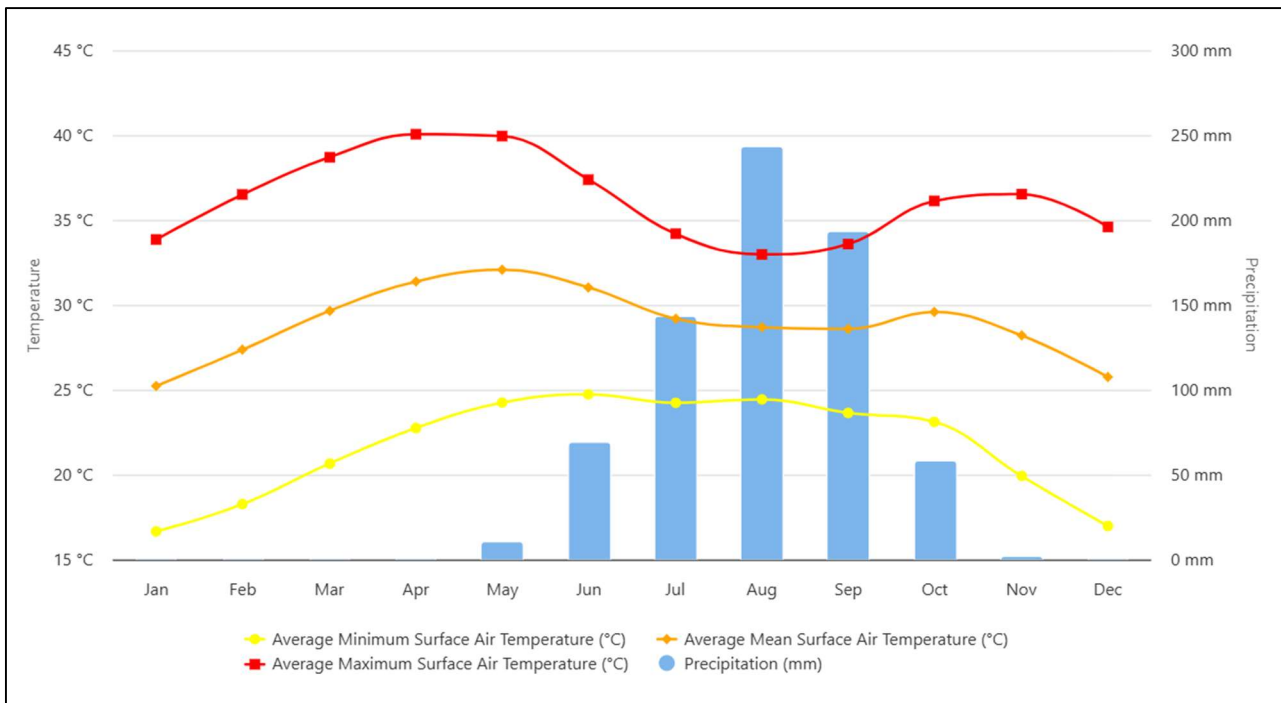


Figura 7 Temperaturas y precipitación mensual medias en Kedougou 1991-2020.

Fuente: World Bank Climate Knowledge Portal

1.3.2. Marco hidrológico

La región de Kedougou se encuentra en la cuenca del río Gambia, el eje hídrico del sureste senegalés y uno de los más importantes de África Occidental. Según la Monographie hydrologique du fleuve Gambie publicada por el ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer), en colaboración con la OMVG (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie), el río Gambia tiene una longitud total de aproximadamente 1.150 km, de los cuales 205 km discurren por Guinea, donde su nacimiento se encuentra a una altitud de 1.125

metros en el macizo del Fouta Djalón, 485 km recorren el territorio senegalés , abasteciendo casi en su totalidad la región de Kedougou, y 460 km corresponden al territorio de Gambia hasta su desembocadura en el Atlántico. La cuenca vertiente total del río Gambia abarca 77.054 km² repartidos entre tres países: Guinea, Senegal y Gambia. En el contexto de Senegal, esta cuenca ocupa el 30% del territorio nacional y aporta aproximadamente 2.700 millones de metros cúbicos anuales de escorrentía (Winrock International, 2021).

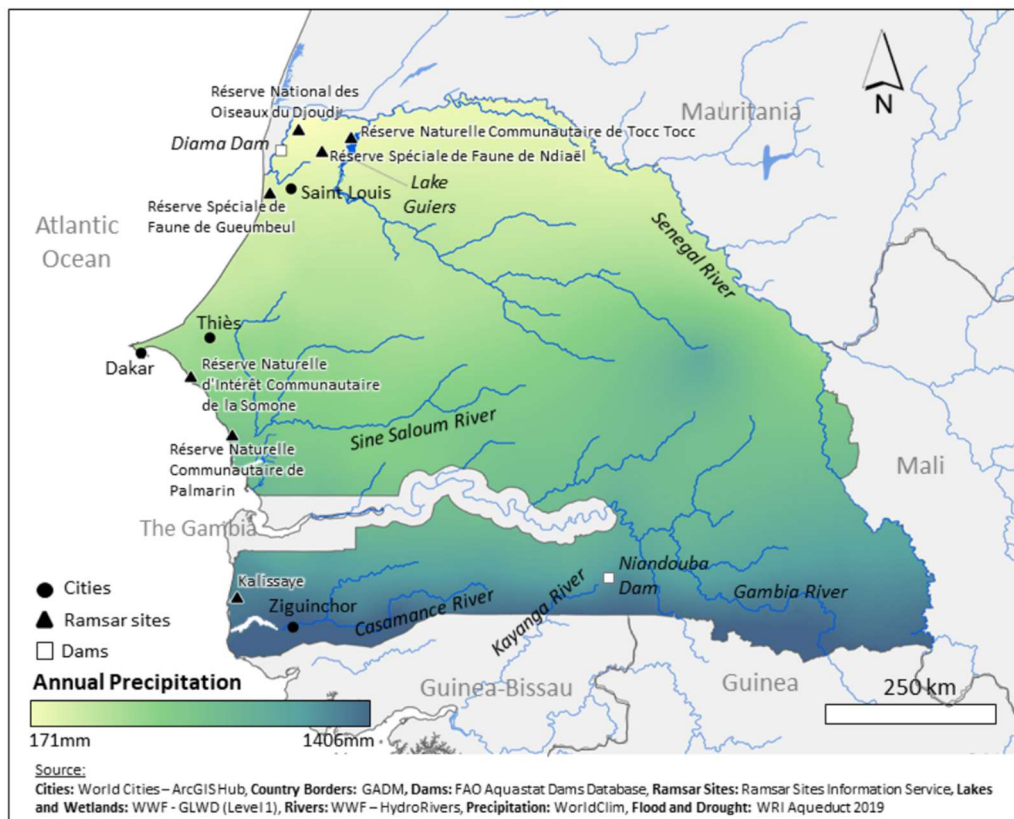


Figura 8 Mapa de recursos hídricos

Fuente: Winrock International, 2021.

El río Gambia presenta en el tramo de estudio un régimen pluvial con una marcada variabilidad estacional: los caudales máximos se registran entre agosto y octubre, durante la estación lluviosa, mientras que la estación seca, de noviembre a mayo, provoca una reducción drástica del caudal. Esta dualidad estacional determina de forma decisiva las condiciones de disponibilidad hídrica para las poblaciones locales, tanto para uso doméstico como para la agricultura y la ganadería.

Un elemento de gobernanza hídrica de primera importancia para Kedougou es la presencia activa de la OMVG, organismo intergubernamental creado el 30 de junio de 1978 que agrupa a Senegal, Gambia, Guinea y Guinea-Bisáu, con sede en Dakar. La OMVG desarrolla misiones conjuntas de seguimiento hidrológico en el tramo Kedougou-Bassé-Bansang en colaboración con la DGPRES senegalesa y el Department of Water Resources (DWR) de Gambia, orientadas a documentar crecidas, reforzar la cooperación transfronteriza y mejorar la prevención y gestión de riesgos de inundación en el contexto de variabilidad climática creciente, según datos de la propia OMVG.

El indicador más concreto del potencial hídrico del río Gambia a su paso por Kedougou es el proyecto de presa hidroeléctrica de Sambangalou. Según la documentación oficial publicada por la OMVG en 2025, el futuro embalse de Sambangalou, situado a 25 km al sur de la ciudad de Kedougou a una altitud de 581 metros sobre el nivel del mar, en la frontera entre Senegal y Guinea, constituirá una presa de 108,3 metros de altura y 540 metros de longitud, con una cota de retención normal de 196 metros. El embalse resultante tendrá una capacidad de almacenamiento de 3.800 millones de m³ sobre una superficie de 188 km², distribuida entre Senegal (18%) y Guinea (82%). La central hidroeléctrica asociada tendrá una potencia instalada de 128 MW con una producción anual estimada de 394,3 GWh de energía renovable. Entre sus efectos hídricos directos, la OMVG prevé el retroceso de la cuña salina del río Gambia en 100 km aguas abajo, la regularización del caudal del río, la reducción de inundaciones en el tramo inferior y un potencial de irrigación de 90.000 hectáreas de tierras agrícolas, de las cuales 40.000 ha corresponden al territorio senegalés y 50.000 ha a Gambia (OMVG, 2025).

El hecho de que un proyecto de esta dimensión técnica y financiera haya sido planificado y esté en construcción en el territorio de Kedougou es una evidencia objetiva de la gran repercusión del río Gambia en este tramo, que sustenta un caudal suficiente para justificar una inversión de estas características. La magnitud del embalse proyectado anticipa transformaciones territoriales, sociales y ambientales de gran alcance que deberán ser objeto de seguimiento riguroso en los próximos años.

Este contexto climático constituye un condicionante de primer orden para el diseño, la implementación y el mantenimiento de las infraestructuras de saneamiento en la región.

1.4. Implicaciones del contexto socioeconómico en el acceso al agua en zonas rurales

1.4.1. Abastecimiento

El desarrollo de las zonas rurales de Senegal es aún insuficiente para proporcionar servicios que se consideran básicos, entre ellos el agua. Las infraestructuras que facilitan la recogida de agua y su suministro han sido en su mayor parte facilitadas por grupos de cooperación y asociaciones. En la región de Kedougou, como se mencionaba en el apartado anterior, la temporada de lluvias va acompañada por una época seca sin aportaciones de agua que influyen en gran medida en la productividad de la población, así como en el uso del agua. Al no contar con infraestructuras capaces de almacenar agua, tales como presas y embalses que puedan distribuir el agua de manera regular durante la época seca, la única forma de acceder al agua es a través de:

- Pozos rasos, cuando el nivel freático es somero y accesible mediante excavación manual, con extracción del agua mediante juego de poleas y recipiente para recogida y elevación. En el caso de Itato, al estar próximo al río Gambia, el nivel freático quedaba lo suficientemente somero para ser accesible a través de pozo de alrededor de 5-8 metros de profundidad, dependiendo de la zona. Algunos de ellos se secan durante la época seca.



Figura 9 Pozo raso manual en una de las concesiones de Itato.

Fuente: Elaboración propia

- Pozos de bombeo, ejecutados mediante perforación dirigida, cuando es necesario buscar acuíferos a mayor profundidad. El agua es extraída mediante una bomba solar, y acumulada en un depósito para asegurar el acceso continuo al recurso.



Figura 10 Pozo de bombeo con depósito. Itato

Fuente: Elaboración propia



Figura 11 Instalación fotovoltaica para bombeo. Itato

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar y se mencionaba anteriormente, las infraestructuras disponibles son muy justas y en su mayor parte facilitadas por inversiones de terceros, debido al bajo nivel de recursos de la población. El agua extraída es consumida directamente por la población, sin ningún tipo de filtro ni control de calidad, siendo un riesgo para la salud, por la posibilidad de transmisión de enfermedades como cólera, disentería o Hepatitis A entre otras.

1.4.2. Saneamiento

De forma análoga al abastecimiento de agua, el acceso a sistemas adecuados de saneamiento en las zonas rurales de Senegal sigue siendo muy limitado, especialmente en regiones como Kedougou, donde la dispersión de los asentamientos y el bajo nivel de recursos económicos dificultan el desarrollo de infraestructuras básicas. En muchos casos, las mejoras en saneamiento han dependido igualmente de proyectos impulsados por organizaciones no gubernamentales y programas de cooperación internacional, sin que exista una cobertura generalizada y sostenida.

En las comunidades rurales, la ausencia de sistemas centralizados de saneamiento conduce mayoritariamente al uso de soluciones individuales precarias o, en numerosos casos, a la práctica de la defecación al aire libre. Esta situación se ve agravada durante la estación de lluvias, cuando el aumento del nivel freático y la escorrentía superficial favorecen la contaminación del suelo y de las fuentes de agua próximas, incrementando el riesgo sanitario para la población.

Las soluciones de saneamiento existentes suelen consistir en letrinas rudimentarias excavadas manualmente, generalmente sin revestimiento ni sistemas adecuados de ventilación o aislamiento. La proximidad del nivel freático, como ocurre en zonas cercanas al río Gambia, limita además la profundidad de excavación y aumenta el riesgo de infiltración de excretas hacia los acuíferos someros utilizados para el abastecimiento doméstico. En muchos casos, estas letrinas presentan una vida útil reducida y deben ser abandonadas o reubicadas, lo que dificulta la adopción de prácticas sostenibles de saneamiento.

La falta de infraestructuras adecuadas de saneamiento, unida al consumo de agua sin tratamiento, genera un entorno propicio para la propagación de enfermedades de origen hídrico, mencionadas anteriormente, afectando de manera especial a la población infantil. Asimismo, la inexistencia de sistemas de gestión de lodos fecales agrava el impacto ambiental y sanitario, al no existir mecanismos para el vaciado, tratamiento o disposición final segura de los residuos.

En este contexto, el saneamiento se convierte en un elemento clave para la mejora de las condiciones de vida y de la salud pública en las zonas rurales de Kedougou. La elección de soluciones técnicas adecuadas debe tener en cuenta las características hidrogeológicas, climáticas y socioeconómicas del entorno, así como la capacidad de la población para su uso, mantenimiento y gestión a largo plazo.

2. Objetivos

En el presente apartado se establece el propósito central de la investigación y el conjunto de metas que estructuran el desarrollo metodológico. La formulación de objetivos sirve como nexo de unión y coherencia entre el diagnóstico territorial expuesto en los antecedentes, el estado del arte de las tecnologías de saneamiento analizado en el capítulo siguiente y el modelo de implementación propuesto en el caso de estudio.

Los objetivos integran dimensiones técnicas, socioeconómicas, ambientales e institucionales.

2.1. Objetivo general

El objetivo general del estudio consiste en el análisis y búsqueda de alternativas de saneamiento descentralizado técnicamente aplicables a las zonas rurales de la región de Kedougou. Se propone un modelo de implementación técnico, adaptado a las condiciones socioeconómicas, climáticas e hidrogeológicas del territorio. En la búsqueda del objetivo, se orienta hacia la sostenibilidad operativa y la integración en un esquema de economía circular. Este propósito se basa en la necesidad de solucionar una cobertura de saneamiento deficitaria: según el Programa Conjunto de Monitoreo (JMP) de la OMS y UNICEF, Senegal registra en sus zonas rurales una proporción elevada de población que practica la defecación al aire libre o recurre a instalaciones no mejoradas. En Kedougou, durante la fase de trabajo de campo, se apreciaron condicionantes específicos de dispersión, nivel freático somero en la proximidad del río Gambia y una capacidad institucional limitada que hacen inviables las soluciones convencionales de saneamiento centralizado.

Para llegar a este objetivo, se ha recurrido a la caracterización del marco territorial de la región de Kedougou, así como a analizar y comparar las principales tecnologías de saneamiento in situ disponibles para contextos rurales de renta baja.

2.2. Objetivos específicos

Para llegar al objetivo general y articular de forma coherente los distintos capítulos del trabajo, se definieron los siguientes objetivos específicos:

Caracterización del marco regional

Caracterizar el contexto socioeconómico, demográfico, climático e hidrogeológico de la región de Kedougou como marco determinante para el diseño de las soluciones a proponer.

Estado del arte

Analizar el estado del arte de las principales tecnologías de saneamiento rural aplicables a contextos de renta baja, evaluando cuatro alternativas: letrina de foso simple, letrina de foso ventilado y mejorado (VIP), sistema de pozos secos gemelos y saneamiento basado en contenedores (CBS).

Análisis multicriterio

Evaluar comparativamente las tecnologías de saneamiento identificadas mediante un marco de análisis multicriterio que integre dimensiones técnicas, económicas, ambientales, sociales e institucionales.

Predimensionamiento de la solución adoptada

Diseño básico de la cadena de servicio del sistema CBS seleccionado, desarrollando las especificaciones técnicas de cada una de sus fases:

- Contención, incluyendo el dimensionamiento básico del contenedor y el sistema de separación de orina en origen.
- Sistema de recogida y transporte.
- Tratamiento, mediante el compostaje termofílico co-compostado, que garantice la higienización completa del producto final antes de su reutilización agrícola.

Marco de oportunidades

Identificar y caracterizar los segmentos de mercado potenciales para la reutilización del compost producido en la región de Kedougou, en cuatro ámbitos diferenciados:

- Agricultura de subsistencia familiar.

- Horticultura comercial periurbana.
- Programas de reforestación.
- Financiación climática a través de créditos de carbono. Modelo de economía circular que relaciona el cierre del ciclo de nutrientes con la sostenibilidad financiera del servicio. (ODS 12: producción y consumo responsables).

3. Metodología

En este capítulo se describe el proceso seguido para dar respuesta a los objetivos planteados. La metodología busca recoger las decisiones que se han tomado a lo largo del trabajo, el orden en que se ha abordado cada problema y los criterios que se han tomado, tanto la selección de fuentes, como la evaluación de las tecnologías.

Se aborda un problema concreto: la falta de saneamiento en las zonas rurales de Kedougou. Esto ha condicionado la forma de trabajar, ya que algunas decisiones metodológicas han sido tomadas sobre la marcha, ajustándose a lo que los datos permitían o a las limitaciones de acceso a información estadística regional que se han encontrado, gran parte de ella en francés, necesitando traducir multitud de artículos y documentos.

El proceso se divide en cuatro grandes fases que se describen a continuación, exponiéndose también las herramientas utilizadas, los criterios aplicados para evaluar las tecnologías y el método de comparación empleado.

3.1. Fases del trabajo

3.1.1. Fase 1. Caracterización del área de estudio

El punto de partida fue entender el dónde y por qué del trabajo. Antes de evaluar ninguna tecnología, era necesario conocer las condiciones del territorio, ya que en saneamiento rural el contexto no es un dato secundario. Esto se pudo apreciar durante la visita, ya que métodos aprendidos o maneras de trabajar que se pueden implementar en zonas desarrolladas y urbanizadas, allí se vio que eran inservibles, siendo el mayor reto.

La caracterización se ha organizado en tres bloques. El primero cubre el marco demográfico y socioeconómico de Senegal y de la región de Kedougou, apoyándose en los datos más recientes del RGPH-5 (ANSD, 2025). El segundo bloque analiza el marco climático, a partir de los Boletines Estacionales del ANACIM (2021) para los trimestres JFM y JAS, contrastados con las series históricas del Climate Knowledge Portal del Banco Mundial (1991-2020). El tercer bloque aborda la hidrología de la cuenca del río Gambia.

En todos los casos se ha recurrido exclusivamente a fuentes primarias oficiales para su aplicación al TFM, aunque se han utilizado páginas secundarias para ampliar conocimiento de contexto o en la búsqueda de ideas e inspiración. Cuando un dato no ha podido verificarse directamente se ha indicado esta limitación en el texto y no se ha incluido el dato.

3.1.2. Fase 2. Revisión del estado del arte

La segunda fase consistió en revisar la literatura técnica sobre las alternativas de saneamiento aplicables al contexto rural de países de renta baja. Se buscó identificar las tecnologías con mayor presencia en contextos similares al de Kedougou y comprender cómo funcionan, cuáles son sus limitaciones reales y qué dice la evidencia sobre su desempeño.

Durante esta fase se reflexiona sobre errores constructivos y de metodología en soluciones que se implementan actualmente en Kedougou.

Se seleccionaron cuatro tecnologías: la letrina de foso simple, la letrina de foso ventilado y mejorado (VIP), el sistema de pozos gemelos (en sus variantes VIP doble y Fossa Alternata) y el sistema de saneamiento basado en contenedores (CBS). Estas cuatro tecnologías son las más documentadas para entornos rurales dispersos y sin red de alcantarillado, y representan un grado de complejidad técnica, inversión y dependencia de infraestructura enterrada que permite una comparación razonable.

Para cada tecnología se redacta un resumen técnico siguiendo la estructura del Compendium of Sanitation Systems and Technologies (Tilley et al., 2014). Se tocan temas como el principio de funcionamiento, condicionantes de emplazamiento, dimensionamiento, materiales, costes orientativos de inversión y operación, aspectos de salud pública y sostenibilidad. Las fichas actúan como base de análisis para la fase comparativa posterior. También se revisaron informes de proyectos CBS en funcionamiento: SOIL en Haití, Sanima en Perú y Clean Team en Ghana, para disponer de datos operativos reales más allá de la documentación técnica teórica.

3.1.3. Fase 3. Análisis comparativo y selección de tecnología

Con las fichas técnicas como base, se desarrolló a continuación una matriz de análisis comparativo multicriterio. Esta es la fase metodológica más relevante del trabajo, porque es donde se toman las decisiones que justifican la selección del CBS como tecnología de referencia para el caso de estudio.

La construcción de la matriz ha seguido un proceso iterativo. Se comenzó con un listado inicial de criterios, que fue depurado y reorganizado para eliminar solapamientos y garantizar que cada criterio aportase valor e información diferencial. El resultado final comprende cinco dimensiones de evaluación: condicionantes físicos del emplazamiento, aspectos sanitarios, aspectos constructivos y costes, y dimensión social e institucional. Dentro de estas dimensiones se aplican criterios específicos que se describen en detalle en el apartado [*Análisis comparativo de las tecnologías de saneamiento estudiadas.*](#)

La evaluación de cada tecnología frente a cada criterio no sigue una escala numérica. Se ha optado deliberadamente por una valoración cualitativa estructurada, codificada mediante un sistema de colores (favorable/condicionado/desfavorable/no aplicable), complementada con una descripción narrativa que justifica la valoración y la contextualiza en las condiciones específicas de Kedougou. Este enfoque se prefiere a la asignación de puntuaciones numéricas para evitar una falsa precisión: en saneamiento rural, los factores que determinan el éxito o el fracaso de una tecnología son en muchos casos interdependientes y difícilmente reducibles a un número.

3.1.4. Fase 4. Desarrollo del caso de estudio

Una vez seleccionado el CBS como sistema de referencia, se desarrolla la propuesta de implementación para la región de Kedougou, estructurada a lo largo de la cadena de servicio completa.

La cadena de servicio se entiende como el conjunto de pasos necesarios para que el sistema funcione: desde el momento en que el usuario deposita las excretas en el contenedor hasta que el compost resultante se aplica en el campo. Cada eslabón de esta cadena, compuesta por las fases de contención, recogida y transporte, tratamiento y reutilización, ha sido analizado de forma independiente, identificando los parámetros de diseño clave, las opciones técnicas disponibles y los condicionantes locales que limitan o favorecen cada alternativa.

El dimensionamiento del sistema se ha realizado a partir de datos cuantificados. Para el contenedor, se parte de la producción media de heces establecida por Rose et al. (2015), fijada en 250 g/persona/día (masa húmeda). Para el tratamiento, los parámetros de compostaje termofílico (temperaturas mínimas, tiempos de retención, ratios C:N) se han extraído de la US EPA (2003) y las Directrices de la OMS (WHO, 2006), que son los documentos normativos de referencia internacional. Para la reutilización, los mercados de compost se han caracterizado a partir del contexto agroeconómico descrito en la Fase 1, combinado con la información del informe State of the Sector 2025 de la CBSA y datos de organizaciones en activo como SOIL.

Esta fase también incluye consideraciones sobre la viabilidad institucional y financiera del servicio, entendiendo que un modelo de implementación que no aborde la sostenibilidad operativa tiene un valor práctico limitado. Se recoge en este punto el marco conceptual de la CBSA sobre el papel del sector público como garante de financiación estructural y del sector privado como operador del servicio.

3.2. Herramientas y fuentes utilizadas

Las herramientas empleadas a lo largo del trabajo son de naturaleza diversa: bases de datos estadísticas oficiales, compendios técnicos de referencia internacional, informes de organismos y documentación operativa de proyectos CBS en funcionamiento. Se presentan a continuación organizadas por tipo.

3.2.1. Fuentes estadísticas y demográficas

Los datos demográficos y socioeconómicos de Senegal y Kedougou proceden del Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH-5) publicado por la Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD, 2025). Esta es la fuente oficial de referencia para la población senegalesa, actualizada en 2023. Se han consultado específicamente el Capítulo 1 sobre estructura de la población, la Situación Económica y Social de la región de Kédougou (ANSD, 2024) y el Anuario de Población 2024.

Para el acceso a saneamiento se han consultado los datos del JMP (WHO/UNICEF, s. f.), que es el sistema de monitoreo global de agua y saneamiento reconocido por Naciones Unidas como fuente de referencia para el seguimiento del ODS 6. Los datos del JMP permiten situar la

situación de Senegal en el contexto regional africano y establecer la brecha entre la cobertura actual y las metas de 2030.

3.2.2. Fuentes climáticas e hidrológicas

La caracterización climática se apoya en los Boletines Climáticos Estacionales del ANACIM (2021) para los trimestres JFM y JAS. Estos boletines son publicaciones oficiales de la autoridad meteorológica senegalesa y contienen los registros de temperatura, precipitación y régimen de vientos de las estaciones del país. Como fuente de contraste y para obtener series largas (1991-2020), se ha utilizado el Climate Knowledge Portal del Banco Mundial, que proporciona datos a nivel regional.

Los datos hidrológicos de la cuenca del río Gambia proceden de la Monographie Hydrologique du Fleuve Gambie (Lamagat et al., 1990), publicada por el ORSTOM, y de la documentación oficial de la OMVG disponible en su portal institucional (2025), que incluye los datos técnicos del proyecto de presa de Sambangalou. Se ha recurrido también al informe de Winrock International (2021) sobre agua y saneamiento en Senegal, financiado por USAID.

3.2.3. Referencias técnicas de saneamiento

El documento técnico central del trabajo es el Compendium of Sanitation Systems and Technologies (Tilley et al., 2014), publicado por el instituto Eawag/Sandec. Es la referencia técnica más completa disponible sobre tecnologías de saneamiento descentralizado y ha sido utilizado como base estructural para las fichas técnicas de las cuatro tecnologías analizadas.

Para las letrinas VIP se han consultado las guías G025 y G027 del WEDC de la Universidad de Loughborough (Reed, 2014; Reed, s. f.) y el trabajo de Ryan y Mara para el Banco Mundial sobre diseño de conductos de ventilación. Para los aspectos de reducción de patógenos en fosos, se ha utilizado el informe de Cisneros (2011) sobre saneamiento en áreas de bajo desarrollo económico.

El marco normativo para el tratamiento de excretas y la calidad microbiológica del compost producido está definido por las Directrices de la OMS para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises en agricultura, Volumen 4 (WHO, 2006), que establece los umbrales de referencia aceptados internacionalmente. El estándar técnico de inactivación de patógenos en

compostaje procede de la US EPA (2003). La caracterización de las excretas, con datos sobre producción diaria por persona, contenido en agua, densidad aparente, se apoya en Rose et al. (2015), que es la revisión bibliográfica más citada sobre este tema.

La fuente principal para el sistema CBS específicamente, es el informe State of the Sector 2025 de la Container-Based Sanitation Alliance (CBSA, 2025), organización que agrupa a los operadores CBS a nivel mundial. Se han utilizado también el estudio de costes de Tilmans et al. (2015) sobre el proyecto de Cap Haïtien (Haití) y el Policy Brief de la CBSA sobre créditos de carbono (CBSA, 2023).

3.2.4. Herramientas de elaboración y análisis

No se ha utilizado software de modelización hidrológica ni de simulación de procesos. El dimensionamiento del sistema CBS se ha realizado mediante cálculo manual a partir de las relaciones descritas en la bibliografía, lo cual es coherente con el nivel de detalle de una propuesta de prefactibilidad. Los resultados se presentan con los rangos de incertidumbre que corresponden a la escala del estudio.

La información se ha estructurado y presentado en tablas de síntesis y matrices elaboradas con procesadores de texto y hoja de cálculo estándar. No se ha utilizado ningún sistema de información geográfica, aunque algunos de los mapas incluidos como referencia de localización proceden de cartografía oficial del ANSD.

3.3. Criterios de evaluación

La selección de criterios de evaluación responde a una idea básica: en contextos rurales de renta baja, ningún criterio técnico puede analizarse de forma aislada. Una tecnología puede ser técnicamente impecable y fracasar por razones económicas o culturales. O puede ser económicamente accesible pero ambientalmente inapropiada para las condiciones hidrogeológicas del lugar. Por eso, la evaluación se ha diseñado para capturar esta interdependencia.

Se han estructurado los criterios en cinco dimensiones, cada una de las cuales refleja un aspecto diferente de la viabilidad del sistema:

3.3.1. Dimensión 1. Condicionantes físicos del emplazamiento

Incluye criterios relacionados con la geología y la hidrogeología del terreno. Concretamente, se evalúa la dependencia de la tecnología respecto a las condiciones del suelo (necesidad de excavación, riesgo de colapso en suelos arenosos, profundidad de excavación requerida) y el riesgo de contaminación de acuíferos por infiltración de excretas sin tratamiento. Este último criterio es especialmente relevante en Kedougou, donde el nivel freático es somero en las proximidades del río Gambia y las fuentes de agua subterránea son utilizadas directamente para consumo doméstico sin tratamiento previo.

3.3.2. Dimensión 2. Aspectos sanitarios

Aquí se incluyen criterios relacionados con la eficacia de la tecnología en la reducción de riesgos para la salud. Se evalúa la capacidad de reducción de patógenos en el punto de contención, el control de olores y de moscas, el riesgo de exposición directa durante el uso y mantenimiento, y el potencial de valorización del material tratado. La presencia de enfermedades de transmisión fecal-oral en la región justifica que este bloque reciba una atención especial en la evaluación.

3.3.3. Dimensión 3. Aspectos constructivos y costes

En este bloque se busca analizar la accesibilidad económica real de cada tecnología para los hogares de Kedougou. Se distingue entre coste de capital, referido a la inversión inicial para la construcción o adquisición del sistema, y coste de operación y mantenimiento anual. Esta distinción es fundamental: la letrina de foso simple tiene un coste de O&M prácticamente nulo, pero una inversión inicial que puede equivaler a varios meses de ingresos de una familia rural.

Se evalúan también la complejidad constructiva, en términos de conocimiento técnico y mano de obra disponible localmente, y la vida útil esperada del sistema en las condiciones climáticas de la región, donde la temperatura, la estación húmeda y la oscilación del nivel freático aceleran la degradación de los materiales.

3.3.4. Dimensión 4. Sostenibilidad ambiental

Recoge los criterios relacionados con el impacto ambiental de cada tecnología a lo largo de su ciclo de vida. Se consideran el potencial de contaminación del suelo y los acuíferos, la generación de emisiones de gases de efecto invernadero durante el almacenamiento de excretas y el potencial de valorización de los subproductos como recursos agrícolas dentro de un modelo de economía circular.

3.3.5. Dimensión 5. Factores sociales e institucionales

Aquí se recogen los aspectos que determinan si una tecnología puede funcionar en la práctica más allá de su viabilidad técnica. Se incluyó la aceptabilidad cultural del sistema, la necesidad de un operador externo para su funcionamiento (elemento crítico para el CBS, que sin servicio de recogida no opera), el acceso de grupos vulnerables y los requerimientos en términos de capacidad institucional local para gestionar el servicio.

Este bloque recoge también la experiencia documentada en proyectos similares: en los tres casos de referencia analizados (SOIL en Haití, Sanima en Perú y Clean Team en Ghana) la aceptación social y el nivel de uso sostenido del sistema han demostrado ser tan determinantes para el éxito del proyecto como los parámetros técnicos de diseño.

3.4. Método de comparación

La comparación entre tecnologías se ha realizado mediante una matriz de evaluación multicriterio de elaboración propia, construida específicamente para el contexto de Kedougou. No se trata de una herramienta genérica aplicada sin adaptación: los criterios seleccionados y los pesos implícitos en la evaluación reflejan las condiciones particulares del territorio, identificadas durante la Fase 1 de caracterización.

3.4.1. Estructura de la matriz

La matriz tiene una estructura de doble entrada. Las filas corresponden a los criterios de evaluación, organizados según las cinco dimensiones descritas en el apartado anterior, mientras que las columnas corresponden a las cuatro tecnologías analizadas, con una quinta columna

dedicada a la adecuación de cada criterio al contexto específico de Kedougou. Esta última columna es importante: no todos los criterios tienen el mismo peso en todos los contextos. La profundidad del nivel freático, por ejemplo, es un criterio especialmente relevante en las zonas de ribera del Gambia y condiciona de forma decisiva la viabilidad de las letrinas de foso.

3.4.2. Sistema de valoración

Cada celda de la matriz contiene una valoración codificada mediante color y una descripción narrativa breve. El sistema de colores que se utiliza es el siguiente:

Color	Categoría	Significado en el contexto de evaluación
Verde	Favorable / ventaja diferencial	La tecnología responde bien al criterio en el contexto de Kedougou. No implica que sea perfecta, sino que no supone una limitación relevante.
Amarillo	Condicionado / moderado	La tecnología cumple el criterio de forma parcial o con condicionantes importantes que pueden ser gestionables.
Rojo	Desfavorable / riesgo elevado	El criterio representa una limitación significativa o un riesgo que compromete la viabilidad del sistema en el contexto analizado.
Gris	Neutro / no aplicable	El criterio no es relevante para esta tecnología, o la tecnología no tiene relación directa con él.

Tabla 3 Sistema de colores utilizado en la matriz de análisis.

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Ausencia de ponderación numérica

La matriz no asigna pesos numéricos a los criterios ni calcula una puntuación total para cada tecnología. Esta decisión es deliberada. En el campo del saneamiento descentralizado, la asignación de pesos numéricos tiende a producir resultados que dan una apariencia de precisión que los datos no justifican. Los criterios técnicos y sociales no son commensurables de forma directa: no existe una equivalencia objetiva entre, por ejemplo, el riesgo de contaminación de acuíferos y el coste de capital de construcción.

La selección final del CBS se justifica no por una suma de puntuaciones, sino por la suma de varios factores determinantes: la imposibilidad de las letrinas de foso de garantizar la no contaminación de acuíferos en las zonas de ribera, el coste prohibitivo de la inversión inicial para la mayoría de las familias y el potencial del CBS para integrarse en un modelo de economía circular que contribuya a la sostenibilidad financiera del servicio a largo plazo.

3.4.4. Limitaciones del método

Toda metodología tiene limitaciones, y la de este trabajo no es una excepción. La evaluación se apoya en datos bibliográficos y en la observación directa del territorio durante el trabajo de campo previo al TFM, pero no incluye encuestas formales a la población ni estudios de aceptabilidad. Los datos de costes son orientativos y proceden de proyectos comparables, no de presupuestos elaborados para Kedougou específicamente.

Estas limitaciones no invalidan las conclusiones, pero sí establecen el nivel de precisión apropiado. El trabajo se sitúa en el nivel de prefactibilidad: sus resultados son suficientes para fundamentar la selección de tecnología y diseñar la cadena de servicio en sus parámetros principales, pero no sustituyen a un estudio de viabilidad detallado que debería realizarse en una fase posterior, con datos primarios recogidos en campo y con la participación activa de las comunidades afectadas.

4. Alternativas de saneamiento descentralizado

4.1. Saneamiento rural en países de renta baja

El saneamiento rural constituye uno de los principales desafíos del desarrollo en los países de renta baja, especialmente en África subsahariana, donde una parte significativa de la población vive en asentamientos dispersos y depende de sistemas tradicionales de abastecimiento de agua y eliminación de excretas. A pesar de los avances registrados en las últimas décadas, el acceso a servicios de saneamiento mejorado continúa siendo limitado en las zonas rurales, lo que tiene implicaciones directas sobre la salud pública, el medio ambiente y el desarrollo socioeconómico.

La falta de infraestructuras adecuadas de saneamiento está estrechamente vinculada a factores estructurales como la pobreza, la baja densidad poblacional, la limitada capacidad institucional y la insuficiente inversión pública. A diferencia de los entornos urbanos, donde los sistemas centralizados pueden resultar viables, en las zonas rurales los modelos convencionales de alcantarillado presentan elevados costes de inversión, operación y mantenimiento, lo que hace necesaria la adopción de soluciones descentralizadas y adaptadas a las condiciones locales.

4.1.1. Acceso al saneamiento y prácticas predominantes

En numerosos países de renta baja, una proporción significativa de la población rural carece de acceso a instalaciones básicas de saneamiento, recurriendo a prácticas como la defecación al aire libre o al uso de letrinas rudimentarias sin condiciones adecuadas de higiene. Estas prácticas son especialmente comunes en comunidades con elevados niveles de pobreza y bajo acceso a educación, donde el saneamiento no siempre se percibe como una prioridad frente a otras necesidades básicas. Según el Programa Conjunto de Monitoreo (JMP) establecido en 1990 por la OMS y UNICEF, que es la principal iniciativa global para el seguimiento del progreso en agua potable, saneamiento e higiene escolar (WASH), en 2021, la población rural representa más del 70 % de las personas que practican la defecación al aire libre a nivel mundial.

WASH se incluyó en la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030, ODS 6, apareciendo en las metas 6.1 y 6.2.

“Meta 6.1 De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos

6.1.1 Proporción de la población que utiliza servicios de agua gestionados de manera segura

Meta 6.2 De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.”

La defecación al aire libre sigue siendo una práctica extendida en amplias zonas rurales de África, con consecuencias negativas para la salud y el medio ambiente. Durante la estación de lluvias, la escorrentía superficial y la infiltración favorecen la dispersión de patógenos, contaminando el suelo y las fuentes de agua utilizadas para consumo doméstico. Esta situación incrementa la incidencia de enfermedades de transmisión hídrica, afectando de manera desproporcionada a la población infantil.

Además de las prácticas predominantes descritas, los datos más recientes del Informe GLAAS 2025 sobre sistemas de agua potable, saneamiento e higiene en el mundo ponen de relieve la enorme brecha existente entre las metas internacionales y la realidad en los países de bajos ingresos. Aunque la mayoría de países han adoptado políticas y objetivos nacionales para mejorar el acceso a servicios de saneamiento rural, menos del 13 % declararon contar con recursos financieros y humanos suficientes para implementar plenamente sus planes de WASH, lo que evidencia un obstáculo estructural grave para la consecución de las metas de acceso

universal antes de 2030. Asimismo, existe una marcada insuficiencia de financiación dedicada específicamente a saneamiento, siendo este subsector históricamente priorizado por debajo del abastecimiento de agua, y con menos de una cuarta parte de los países señalando suficiente financiamiento para alcanzar sus objetivos sanitarios nacionales. Este déficit de recursos, junto con problemas de fragmentación institucional y escasez de personal especializado en zonas rurales, dificulta la expansión y sostenibilidad de servicios mejorados y plantea serias dudas sobre la capacidad de cumplir los objetivos de los ODS 6.1 y 6.2 en el plazo establecido.

4.1.2. Relación entre saneamiento, salud y desarrollo

La ausencia de sistemas adecuados de saneamiento constituye uno de los principales determinantes de la carga de enfermedades evitables en los países de renta baja. Las enfermedades diarreicas, el cólera, la fiebre tifoidea y otras infecciones de origen fecal-oral están estrechamente relacionadas con la falta de eliminación segura de excretas y con prácticas deficientes de higiene.

Desde una perspectiva de desarrollo, el impacto del saneamiento trasciende el ámbito sanitario. La elevada morbilidad asociada a enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento reduce la productividad laboral, incrementa el gasto sanitario de los hogares y limita la asistencia escolar, especialmente en el caso de los niños y las niñas. En este sentido, la mejora del saneamiento rural se considera un factor clave para romper el ciclo de pobreza y favorecer el desarrollo humano sostenible.

4.1.3. Enfoques y estrategias en saneamiento rural

A lo largo de las últimas décadas, los programas de saneamiento rural en países de renta baja han evolucionado hacia estrategias más integrales que incorporan aspectos sociales, culturales y de comportamiento, y no únicamente la construcción de una infraestructura. En este contexto, han cobrado relevancia los enfoques comunitarios, que promueven la participación activa de la población en la adopción y mantenimiento de soluciones de saneamiento.

Estos enfoques parten del reconocimiento de que la simple provisión de infraestructuras no garantiza su uso ni su sostenibilidad a largo plazo. Factores como la apropiación comunitaria, la percepción de beneficios sanitarios y la adecuación cultural de las soluciones resultan

determinantes para el éxito de las intervenciones. No obstante, la eficacia de estos enfoques depende en gran medida del acompañamiento técnico y del fortalecimiento de las capacidades locales.

4.1.4. Limitaciones técnicas y contextuales

El diseño e implementación de sistemas de saneamiento rural en países de renta baja se enfrenta a numerosas limitaciones técnicas y contextuales. Entre las más relevantes se encuentran las condiciones hidrogeológicas desfavorables, como niveles freáticos elevados o suelos inestables, que restringen la viabilidad de determinadas tipologías de letrinas. Asimismo, la estacionalidad climática, con alternancia de estaciones secas y lluviosas, influye de manera significativa en el funcionamiento y la durabilidad de las infraestructuras.

A estas limitaciones se suman las restricciones económicas de los hogares rurales, que dificultan la inversión inicial y el mantenimiento de las instalaciones. La ausencia de servicios de gestión de lodos fecales y de cadenas de valor asociadas al saneamiento agrava estas dificultades, incrementando los riesgos ambientales y sanitarios.

En los datos aportados por el JMP, en 2024 solo un 0,4% de la población rural tiene acceso a alcantarillado, siendo las letrinas (34,0%) y las fosas sépticas (29,5%) las soluciones más utilizadas.

4.1.5. Saneamiento rural y sostenibilidad

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el saneamiento rural se reconoce como un elemento esencial para garantizar el acceso universal a servicios básicos y proteger los recursos naturales. En los países de renta baja, la sostenibilidad de las intervenciones en saneamiento depende de la integración de criterios técnicos, sociales, económicos y ambientales, así como de la adaptación de las soluciones a las realidades locales.

En este sentido, el enfoque del saneamiento sostenible pone el énfasis en la reducción de la contaminación, la protección de los recursos hídricos y la valorización de los subproductos generados, abriendo la puerta a modelos basados en la economía circular. Estos enfoques resultan especialmente relevantes en contextos rurales, donde el saneamiento puede contribuir

no solo a la mejora de la salud pública, sino también al fortalecimiento de los sistemas productivos locales.

4.2. Soluciones de saneamiento en zonas rurales de renta baja

La construcción de soluciones de saneamiento en zonas rurales de renta baja se centra principalmente en sistemas descentralizados de construcción in situ asequibles y de bajo mantenimiento que separan higiénicamente las excretas del contacto humano. La búsqueda del acceso universal al saneamiento hace necesario desarrollar alternativas descentralizadas que, sin contar con una red de alcantarillado y un sistema de depuración centralizado, hagan accesible unas condiciones mínimas de higiene y dignidad a la población de zonas rurales o marginales, donde soluciones más avanzadas no son viables.

El saneamiento descentralizado se caracteriza por la captación controlada de efluentes procedentes de edificaciones individuales o agrupaciones residenciales de escala reducida. Este enfoque se contrapone al modelo de saneamiento centralizado, caracterizado por la concentración de los vertidos generados en extensas áreas urbanas de escala municipal o supramunicipal, que son conducidos a través de infraestructuras gran desarrollo longitudinal hasta instalaciones de depuración de elevada capacidad de tratamiento, desde las cuales se restituyen al medio natural tras alcanzar los estándares de calidad exigidos por la normativa ambiental vigente.

A continuación, se procede a describir los distintos sistemas de saneamiento descentralizados utilizados a nivel global.

4.2.1. Letrina de foso simple

La letrina de foso simple la podemos considerar el sistema de saneamiento descentralizado más elemental y extendido globalmente. Su principio de funcionamiento se basa en la excavación de una cavidad en el terreno donde las excretas se depositan directamente, permitiendo que los procesos naturales de infiltración de líquidos hacia el suelo circundante y la degradación microbiana parcial de la materia orgánica reduzcan progresivamente el volumen acumulado, aunque sin proporcionar un tratamiento efectivo que garantice la eliminación completa de patógenos.

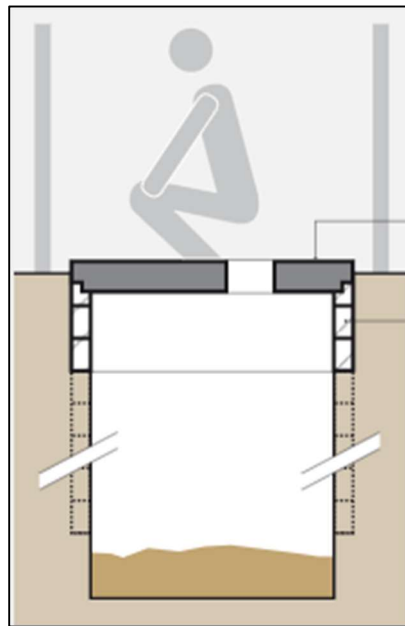


Figura 12 Esquema ilustrativo de letrina de foso simple.

Fuente: EMERSAN Compendium.

Condiciones óptimas de implantación

La implementación viable de letrinas de foso simple requiere la evaluación previa de condicionantes geográficos, climáticos y territoriales que determinan la factibilidad técnica del sistema. Desde el punto de vista geográfico, esta tecnología resulta particularmente apropiada para asentamientos rurales dispersos y áreas periurbanas de baja densidad poblacional donde la conexión a sistemas centralizados de alcantarillado resulta técnica o económicamente inviable. La densidad poblacional óptima para la implementación de letrinas individuales se sitúa por debajo de 150 habitantes por hectárea, umbral por encima del cual la concentración de instalaciones incrementa significativamente el riesgo de saturación del suelo y contaminación

acumulativa de acuíferos. En términos climáticos, las regiones con precipitaciones anuales moderadas entre 500 y 1.500 milímetros favorecen el equilibrio entre la infiltración necesaria para el funcionamiento del sistema y la prevención de anegamientos que comprometerían la integridad estructural. Las zonas con precipitaciones superiores a 2.000 milímetros anuales o con régimen de lluvias intensamente estacional requieren medidas adicionales de protección contra escorrentía y elevación de la estructura. La topografía del terreno debe presentar pendientes inferiores al 15% para facilitar la excavación manual y garantizar la estabilidad estructural, mientras que pendientes superiores requieren técnicas de aterrazamiento o nivelación que incrementan sustancialmente los costos de implantación. La accesibilidad del emplazamiento para el transporte de materiales de construcción es un factor determinante que puede condicionar la viabilidad operativa del sistema.

Condiciones hidrogeológicas y edafológicas

Las características hidrogeológicas y edafológicas del emplazamiento constituyen los factores técnicos más críticos que condicionan la viabilidad, el diseño específico y el riesgo ambiental asociado a las letrinas de foso simple. La profundidad del nivel freático representa el parámetro hidrogeológico fundamental, estableciéndose como requisito técnico ineludible que la base del foso se mantenga a una distancia vertical mínima de 3 metros por encima del nivel freático más elevado registrado durante el ciclo hidrológico anual completo, incluyendo las fluctuaciones estacionales que típicamente elevan el nivel saturado durante períodos de recarga intensiva en épocas lluviosas. Esta separación vertical de seguridad permite que la zona no saturada del suelo actúe como medio filtrante natural, donde operan simultáneamente procesos de adsorción de contaminantes en la matriz del suelo mediante mecanismos de intercambio catiónico y fijación fisicoquímica, filtración física de partículas y microorganismos patógenos, degradación biológica mediante actividad microbiana aerobia, y atenuación de la carga contaminante por dilución y dispersión, reduciendo así significativamente el riesgo de contaminación directa del acuífero subyacente.

La tipología edafológica determina tanto la viabilidad constructiva como el comportamiento funcional del sistema durante su vida útil. Los suelos arcillosos de alta plasticidad con contenidos de arcilla superiores al 40% presentan ventajas significativas en términos de estabilidad de las paredes excavadas, permitiendo excavaciones profundas sin necesidad de revestimiento extensivo, aunque su baja permeabilidad con conductividades hidráulicas típicamente inferiores

a 10^{-6} cm/s limita severamente la infiltración de la fracción líquida, provocando acumulación acelerada de efluentes y reducción drástica de la vida útil del foso. Los suelos franco-arcillosos y francos, con contenidos de arcilla entre 20% y 35% y conductividades hidráulicas en el rango de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, constituyen el sustrato óptimo al proporcionar simultáneamente estabilidad estructural suficiente y capacidad de infiltración adecuada que equilibra la eliminación progresiva de líquidos con la retención efectiva de patógenos mediante filtración. Los suelos arenosos y gravosos, con conductividades hidráulicas superiores a 10^{-3} cm/s, favorecen tasas elevadas de infiltración que prolongan la vida útil del foso, pero presentan desventajas críticas derivadas de la escasa estabilidad estructural que requiere revestimiento completo hasta la base del foso, y particularmente del riesgo sanitario elevado asociado al transporte acelerado de contaminantes microbiológicos hacia el acuífero con distancias de migración horizontal que pueden superar los 20 metros en condiciones de saturación del medio.

La estratigrafía del subsuelo debe evaluarse mediante calicatas exploratorias que alcancen al menos 1 metro por debajo de la profundidad proyectada del foso, identificando la presencia de horizontes impermeables subyacentes como arcillas expansivas o capas de roca consolidada que podrían generar acumulación de agua percheda, así como capas de alta permeabilidad como gravas o arenas que facilitarían el transporte lateral acelerado de contaminantes. La presencia de roca madre a profundidades inferiores a 2 metros imposibilita técnicamente la excavación manual convencional y requiere la adopción de configuraciones elevadas sobre el nivel del terreno natural. El riesgo de inundación debe cartografiarse mediante identificación de zonas con probabilidad de anegamiento superior al 10% en períodos de retorno de 10 años, las cuales requieren medidas adicionales de protección mediante elevación del montículo, sistemas de drenaje perimetral y barreras de desviación de escorrentía que incrementan los costos de implantación entre 30% y 50% respecto a la propuesta inicial.

Marco normativo y cumplimiento regulatorio

La implementación de letrinas de foso simple debe ajustarse rigurosamente al marco normativo vigente en materia de saneamiento básico, salud pública, protección ambiental y ordenamiento territorial, el cual presenta variabilidad significativa entre jurisdicciones, pero converge en principios fundamentales establecidos por organismos internacionales. A nivel internacional, las Directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Excretas y Aguas Grises constituyen el marco técnico de referencia, estableciendo

criterios cuantitativos de reducción de patógenos y distancias mínimas de seguridad respecto a fuentes de agua. El Proyecto Esfera, que define estándares humanitarios mínimos en situaciones de emergencia y que ha sido adoptado como referencia técnica por numerosas agencias de cooperación internacional, especifica una distancia horizontal mínima de 30 metros entre letrinas y fuentes de agua de consumo humano, combinada con la exigencia de que la base del foso se sitúe al menos 1,5 metros por encima del nivel freático, criterios que representan el consenso técnico internacional sobre protección sanitaria básica. Obviamente esta distancia es orientativa, ya que, tal y como se comentaba en el apartado anterior, la transmisión de patógenos e infiltración en el terreno, dependerá de las características de éste.

Las regulaciones ambientales, particularmente aquellas vinculadas a la protección de recursos hídricos subterráneos, han incorporado progresivamente restricciones más estrictas en zonas declaradas como áreas de recarga acuífera prioritaria o zonas de protección de fuentes de abastecimiento público, donde en algunos casos se prohíbe completamente la construcción de sistemas de saneamiento in situ que infiltren efluentes no tratados al subsuelo. El cumplimiento de estos marcos regulatorios no constituye únicamente una obligación legal sino una garantía técnica de que el sistema operará dentro de parámetros sanitariamente seguros, por lo que la identificación exhaustiva de la normativa aplicable debe constituir el primer paso en cualquier proceso de planificación de programas de saneamiento basados en esta tecnología. Esto entra dentro de un marco teórico, ya que por la experiencia vivida in situ, ya que la regulación en lo que a higiene se refiere, a nivel social no ha conseguido todavía tener un peso importante.

Dimensionamiento y criterios geométricos

Los parámetros dimensionales del foso responden a criterios tales como funcionalidad operativa, seguridad estructural, durabilidad proyectada del sistema y minimización del riesgo sanitario. La profundidad del foso constituye el parámetro crítico que determina la vida útil de la instalación, estableciéndose como valor mínimo recomendado 3 metros para una unidad familiar típica de cinco usuarios con un período de diseño de tres a cinco años, aunque esta profundidad puede extenderse hasta alcanzar entre 5 y 7 metros cuando se pretende prolongar significativamente la vida útil sin necesidad de vaciado o reubicación prematura, siempre y cuando la profundidad del nivel freático permita mantener la distancia vertical de seguridad de 3 metros entre la base del foso y el nivel saturado máximo estacional. Profundidades superiores a 7 metros raramente resultan viables técnicamente debido a las dificultades constructivas

asociadas a la excavación manual en condiciones de confinamiento espacial creciente, al incremento exponencial del riesgo de colapso de paredes conforme aumenta la altura vertical de suelo no soportado, y a la mayor complejidad de las operaciones de vaciado cuando el foso alcanza su capacidad máxima. Tampoco se consideran profundidades realistas en nuestra zona de estudio, ya que el aumento del costo debido a dimensiones tan grandes de excavación no es asumible por las familias.

El diámetro interno del foso se establece en un valor mínimo de 1 metro, dimensión que proporciona un equilibrio adecuado entre volumen útil, estabilidad estructural y viabilidad de excavación manual. Diámetros inferiores a 0,80 metros dificultan severamente las operaciones de excavación, particularmente a profundidades superiores a 3 metros donde el espacio de maniobra resulta extremadamente restringido, mientras que diámetros superiores a 1,5 metros incrementan significativamente el riesgo de colapso lateral de las paredes del foso, especialmente en suelos granulares, arenosos o poco cohesivos donde la resistencia al corte y la capacidad de autosostenimiento del material excavado resultan insuficientes para mantener la estabilidad de excavaciones de gran sección transversal. Para facilitar las labores de excavación manual en suelos cohesivos firmes, puede adoptarse un diámetro de 1,2 metros, dimensión que representa un compromiso razonable entre facilidad constructiva y seguridad estructural en la mayoría de las condiciones edafológicas encontradas en la práctica.

En el caso de realizar la letrina con forma cilíndrica, el volumen útil del foso debe calcularse mediante la fórmula geométrica estándar para cilindros $V = \pi \times r^2 \times h$, donde r representa el radio interno efectivo del foso y h la profundidad útil disponible para acumulación de excretas, entendiendo como tal la distancia vertical entre la cara inferior de la losa de cobertura y la base del foso. En casos de elegir una geometría distinta a la mencionada, habría que modificar la fórmula de cálculo, utilizando la asociada a la geometría elegida. Para garantizar una vida útil mínima razonable, el volumen total no debe ser inferior a 1.000 litros, aunque volúmenes entre 3.000 y 5.000 litros resultan más apropiados para instalaciones familiares permanentes que aspiren a períodos de servicio superiores a cinco años.

La tasa de acumulación de sólidos constituye el parámetro fundamental para el cálculo de la vida útil proyectada del sistema, presentando variabilidad significativa en función de los hábitos de limpieza anal de los usuarios y del tipo de materiales empleados para este propósito. Los estudios técnicos realizados en diversos contextos geográficos y culturales han establecido valores de referencia que oscilan entre 40 y 60 litros por persona y año bajo condiciones de uso de agua para limpieza anal o empleo mínimo de papel higiénico, pudiendo incrementarse hasta

90 litros por persona y año cuando se utilizan sistemáticamente materiales de limpieza anal secos tales como papel en cantidades significativas, hojas vegetales, mazorcas de maíz, piedras o materiales fibrosos diversos que aportan volumen sustancial al residuo depositado sin contribuir procesos significativos de descomposición o compactación natural. Para el dimensionamiento conservador del sistema, particularmente en programas de cobertura masiva donde la supervisión individualizada resulta impracticable, se recomienda adoptar el valor superior de 90 litros por persona y año, lo cual garantiza que la capacidad proyectada del foso no será superada prematuramente por tasas de acumulación superiores a las previstas en el diseño original.

La configuración geométrica en planta del foso responde mayoritariamente a una sección circular, configuración que proporciona ventajas estructurales derivadas de la distribución uniforme de tensiones circunferenciales en el revestimiento, minimiza el volumen de material de revestimiento requerido por unidad de volumen útil del foso, y facilita las operaciones de excavación manual mediante rotación del excavador en torno a un eje central. Configuraciones cuadradas o rectangulares resultan estructuralmente menos eficientes, concentrando tensiones en las esquinas y requiriendo mayor cantidad de material de revestimiento, aunque pueden justificarse en casos específicos donde la disponibilidad de materiales prefabricados modulares rectangulares o la necesidad de maximizar el aprovechamiento de espacios reducidos así lo requieran.

Materiales de construcción

La selección de materiales para los diferentes componentes estructurales de la letrina de foso simple debe fundamentarse en criterios técnicos que balanceen adecuadamente aspectos de resistencia mecánica, durabilidad proyectada, disponibilidad en el mercado local, costo económico accesible para la población objetivo, compatibilidad con técnicas constructivas tradicionales manejadas por albañiles locales, y en el caso específico del revestimiento del foso, la capacidad de permitir permeabilidad controlada para la infiltración lateral de la fracción líquida de las excretas.

El revestimiento del foso cumple funciones estructurales críticas de contención lateral del suelo circundante previniendo el colapso de las paredes excavadas, soporte de cargas verticales transmitidas desde la losa de cobertura, y durabilidad a largo plazo del sistema frente a la acción agresiva del medio químicamente activo del interior del foso donde la descomposición anaerobia

de materia orgánica genera compuestos ácidos y sulfurosos que pueden atacar progresivamente ciertos materiales constructivos. Los materiales empleados habitualmente incluyen ladrillos cerámicos cocidos de arcilla, solución que garantiza durabilidad adecuada en ambientes húmedos, y bloques huecos de hormigón, que constituyen una alternativa económica ampliamente disponible en mercados latinoamericanos, aunque su mayor porosidad comparada con el ladrillo cocido puede reducir su durabilidad en condiciones de humedad permanente.

Los bloques de suelo-cemento fabricados mediante compactación manual o mecánica de mezclas de suelo seleccionado con contenidos de cemento entre 6% y 10% en peso representan una opción de bajo costo particularmente apropiada para programas de autoconstrucción comunitaria, resultan suficientes para revestimientos de fosos de profundidad moderada, aunque requieren protección superficial mediante revoques de mortero para prevenir la erosión progresiva por contacto con la humedad. La mampostería de piedra natural extraída localmente, asentada con mortero de cemento-arena, constituye una solución tradicional de elevada durabilidad y bajo costo en regiones con disponibilidad de material pétreo apropiado, aunque requiere mano de obra especializada en técnicas de cantería que puede no estar disponible universalmente. La madera resistente a la pudrición y al ataque de termitas, tal como especies tropicales de elevada densidad tratadas con preservantes fungicidas e insecticidas, puede emplearse en contextos específicos donde la disponibilidad y el costo de materiales pétreos o cementosos resulte prohibitivo, aunque presenta limitaciones de durabilidad que típicamente no superan los 5 a 8 años bajo condiciones de humedad permanente.

Para instalaciones de carácter temporal con vida útil prevista inferior a 2 años, típicamente en contextos de emergencias humanitarias o asentamientos provisionales, pueden emplearse materiales de menor durabilidad como bambú de diámetro superior a 8 centímetros, cañas de especies locales resistentes, o tablonces de madera no tratada, aceptando la limitación temporal inherente a estos materiales que experimentarán degradación acelerada en contacto con el ambiente húmedo y químicamente agresivo del interior del foso.

La decisión sobre la extensión vertical del revestimiento debe fundamentarse rigurosamente en las características geomecánicas del terreno. Las directrices técnicas establecen de manera inequívoca que los 0,5 a 1 metros superiores del foso deben revestirse obligatoriamente en la totalidad de los casos, independientemente de la naturaleza y estabilidad del suelo subyacente, cumpliendo simultáneamente tres funciones críticas: proporcionar soporte estructural concentrado para las cargas transmitidas por la losa de cobertura, que se distribuyen perimetralmente sobre el borde superior del revestimiento; prevenir la excavación lateral de

roedores que podrían generar galerías comunicadas con el interior del foso creando vías de dispersión de contaminantes y vectores; y garantizar estanqueidad en la zona inmediata inferior a la losa donde el contacto con materiales frescos resulta más frecuente.

Para la sección inferior del foso, la necesidad de revestimiento adicional se determina mediante evaluación de la estabilidad natural del suelo. En terrenos cohesivos firmes, clasificados geotécnicamente como arcillas de consistencia firme a muy firme, limos de compacidad media a densa, o suelos residuales estructurados que no presentan horizontes arenosos sueltos, gravosos o con contenido significativo de materia orgánica descompuesta, puede prescindirse del revestimiento en profundidad siempre y cuando se verifique mediante inspección visual de las paredes excavadas que el material mantiene estabilidad autoportante sin agrietamientos, desprendimientos o indicios de colapso incipiente tanto durante la estación seca como en períodos de máxima humedad estacional. En contraste, los suelos granulares, arenas de compacidad suelta a media, gravas, materiales de relleno antrópico no consolidado, o suelos orgánicos con contenido de materia orgánica superior al 10% requieren imperativa revestimiento estructural completo desde la losa de cobertura hasta la base del foso para prevenir el colapso progresivo o súbito de las paredes excavadas que podría generar situaciones de riesgo grave durante las operaciones de construcción o posteriores labores de mantenimiento.

Este revestimiento de la sección inferior debe ejecutarse con juntas parcialmente abiertas o deliberadamente permeables, manteniendo separaciones entre elementos de mampostería del orden de 10 a 20 milímetros sin relleno de mortero, o empleando mortero de baja resistencia con dosificaciones pobres en cemento que permitan permeabilidad intersticial. Esta configuración permeable resulta esencial para mantener la capacidad de percolación lateral de la fracción líquida de las excretas hacia el suelo circundante, proceso fundamental que controla la tasa de llenado del foso y constituye el principio operativo básico del sistema. La impermeabilización completa del revestimiento en toda la profundidad del foso eliminaría la infiltración lateral, convirtiendo el sistema en un tanque estanco que se llenaría en plazos extremadamente breves.

La losa o solera de cobertura que cierra superiormente el foso debe construirse empleando materiales que proporcionen simultáneamente resistencia mecánica suficiente para soportar las cargas de uso sin deflexiones excesivas ni riesgo de colapso, superficie superior lisa e impermeable que permita operaciones de limpieza higiénica efectiva, y durabilidad proyectada coherente con la vida útil prevista del sistema completo. El hormigón armado constituye el material de referencia técnica óptimo, ejecutado mediante losas de espesor no inferior a 80

milímetros para diámetros de foso de 1 metro, incrementándose hasta 100 milímetros para diámetros de 1,5 metros, con dosificación de hormigón no inferior a 1:2:3 (cemento-arena-grava) que garantiza resistencia característica a la compresión de al menos 175 kg/cm² a los 28 días de curado. La armadura de refuerzo debe consistir en una malla bidireccional de barras de acero corrugado de diámetro mínimo 6 milímetros espaciadas a intervalos no superiores a 150 milímetros en ambas direcciones, posicionada en la zona traccionada de la losa mediante separadores que garanticen un recubrimiento mínimo de hormigón de 20 milímetros para protección contra la corrosión del acero.

Como alternativa económica en contextos donde el acceso a cemento resulte limitado o excesivamente costoso, pueden emplearse losas de madera dura de especies resistentes a la pudrición y al ataque de insectos xilófagos, con espesor mínimo de 40 milímetros y tratamiento preservante mediante sales de cobre-cromo-arsénico u otros compuestos fungicidas-insecticidas aprobados para uso en aplicaciones sanitarias, aceptando una durabilidad reducida típicamente entre 5 y 10 años bajo condiciones de uso normal y mantenimiento adecuado. Independientemente del material empleado, la losa debe situarse elevada al menos 100 milímetros por encima del nivel del terreno natural circundante, configuración que previene eficazmente la entrada de escorrentía superficial durante eventos de precipitación que podría infiltrarse al interior del foso provocando anegamiento rápido, desbordamiento del contenido, y dispersión incontrolada de excretas en el entorno inmediato con graves implicaciones sanitarias.



Figura 13 Acabado superior de letrina tipo construida por Yakaar Africa. Itato.

Fuente: Elaboración propia

Aplicabilidad

La letrina de foso simple presenta un ámbito de aplicabilidad técnica delimitado por condicionantes hidrogeológicos, demográficos, socioeconómicos y regulatorios que determinan los contextos donde esta tecnología constituye una solución apropiada y aquellos donde resulta inadecuada o contraindicada. Desde la perspectiva del contexto territorial, esta tecnología se aplica predominantemente en áreas rurales dispersas donde la densidad poblacional no supera los 150 habitantes por hectárea y la distancia entre viviendas permite mantener separaciones suficientes entre sistemas de saneamiento y fuentes de abastecimiento de agua. En asentamientos periurbanos de densidad intermedia, la aplicabilidad se encuentra condicionada por la disponibilidad de espacio suficiente en las concesiones individuales para ubicar la letrina manteniendo distancias regulatorias respecto a edificaciones vecinas, típicamente no inferiores a 3 metros desde límites de propiedad y 5 metros desde viviendas habitadas.

Desde el punto de vista de la escala de servicio, las letrinas de foso simple se diseñan y operan fundamentalmente como instalaciones unifamiliares destinadas a servir grupos familiares típicos de 4 a 8 personas, aunque pueden dimensionarse para uso colectivo por grupos extendidos de hasta 15 usuarios cuando las condiciones espaciales permitan la excavación de fosos de mayor volumen y las modalidades de organización social garanticen responsabilidades compartidas de mantenimiento. Las instalaciones comunitarias que sirven a más de 20 usuarios diarios, tales como las ubicadas en escuelas rurales, centros de salud periféricos o mercados locales, requieren típicamente configuraciones de múltiples cabinas con fosos independientes o la adopción de tecnologías alternativas como letrinas de bóveda elevada o sistemas de doble cámara que faciliten operaciones de vaciado más frecuentes.

La permanencia temporal del asentamiento constituye otro factor determinante de aplicabilidad. Las letrinas de foso simple resultan apropiadas para asentamientos permanentes o con expectativa de ocupación superior a 3 años, plazo mínimo que justifica la inversión en estructuras de revestimiento y superestructura de durabilidad razonable. Para asentamientos temporales o de emergencia con períodos de ocupación previstos inferiores a 2 años, como campamentos de desplazados, alojamientos provisionales post-desastre o asentamientos agrícolas estacionales, pueden justificarse configuraciones simplificadas con materiales de menor durabilidad y costos reducidos, aceptando limitaciones operativas coherentes con el carácter temporal de la instalación.

Las restricciones hidrogeológicas delimitan de manera imperativa las condiciones bajo las cuales esta tecnología resulta contraindicada. Los emplazamientos con nivel freático permanente o estacionalmente elevado que no permite mantener una separación vertical mínima de 3 metros entre la base del foso proyectado y el nivel saturado máximo anual resulta técnicamente inadecuados para letrinas de foso simple convencional. Las zonas inundables con probabilidad de anegamiento superior al 10 por ciento en períodos de retorno de 10 años presentan riesgos operativos significativos de desbordamiento y dispersión de excretas que pueden justificar la exclusión de esta tecnología o requerir medidas extraordinarias de protección que incrementan sustancialmente los costos hasta niveles que pueden comprometer la viabilidad económica del sistema.

Los suelos de permeabilidad extremadamente baja, particularmente arcillas de alta plasticidad con conductividades hidráulicas inferiores a 10^{-7} cm/s, presentan limitaciones funcionales severas derivadas de la acumulación rápida de la fracción líquida que reduce drásticamente la vida útil del foso, mientras que los suelos de permeabilidad extremadamente alta como gravas

limpias y arenas gruesas con conductividades superiores a 10^{-2} cm/s generan riesgos sanitarios elevados por transporte acelerado de contaminantes microbiológicos hacia acuíferos someros empleados para abastecimiento de agua. Las áreas declaradas como zonas de protección estricta de acuíferos empleados para abastecimiento público, los perímetros de protección de manantiales, y las zonas de recarga acuífera prioritaria pueden estar sujetas a prohibiciones regulatorias absolutas para la implementación de cualquier sistema de saneamiento in situ que infiltre efluentes no tratados al subsuelo, independientemente de las características técnicas del diseño propuesto.

Aspectos ambientales y de sostenibilidad

Las letrinas de foso simple presentan implicaciones ambientales significativas que deben evaluarse rigurosamente en términos de riesgo de contaminación de recursos hídricos subterráneos, impacto sobre la calidad del suelo, generación de gases de efecto invernadero, y gestión final de los lodos acumulados cuando el foso alcanza su capacidad máxima. El principal riesgo ambiental se concentra en la contaminación potencial de acuíferos someros empleados como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano, proceso que ocurre mediante el transporte de contaminantes microbiológicos y químicos desde el foso hacia la zona saturada del subsuelo a través de la infiltración de la fracción líquida de las excretas y la migración subsuperficial en dirección del gradiente hidráulico regional.

Las normativas y directrices internacionales han intentado establecer distancias de seguridad que oscilan entre 15 y 30 metros como separación horizontal mínima entre letrinas de foso y puntos de captación de agua subterránea, aunque algunos protocolos nacionales en contextos hidrogeológicos particularmente vulnerables han especificado distancias que alcanzan hasta 75 metros. El Proyecto Esfera, tal y como se comentaba previamente, recomienda una distancia mínima de 30 metros, mientras que la OMS enfatiza que cuando el agua subterránea constituye la única fuente de abastecimiento para consumo humano, debe garantizarse imperativamente el cumplimiento simultáneo de criterios de distanciamiento horizontal y vertical.

La contaminación química del subsuelo por letrinas de foso se manifiesta principalmente a través de la lixiviación de compuestos nitrogenados.

Seguridad y salud

Las letrinas de foso simple presentan consideraciones críticas de seguridad estructural durante las fases de construcción y uso, así como implicaciones sanitarias derivadas tanto de su correcto funcionamiento como de sus limitaciones inherentes en materia de tratamiento de excretas. Los riesgos de seguridad física durante la construcción se concentran primordialmente en el colapso de las paredes del foso durante las operaciones de excavación manual, riesgo que se incrementa exponencialmente con la profundidad excavada y resulta particularmente elevado en suelos arenosos, granulares o poco cohesivos donde la estabilidad de taludes verticales sin soporte resulta precaria. Los datos estadísticos de accidentalidad en programas de construcción masiva de letrinas documentan tasas de incidentes graves que oscilan entre 0,5 y 2 por cada 1.000 fosos excavados, incluyendo colapsos parciales que generan atrapamientos de extremidades inferiores y, en casos menos frecuentes, colapsos totales que pueden generar sepultamiento completo del excavador cuando la profundidad supera los 2 metros.

Las medidas preventivas fundamentales incluyen la limitación de la profundidad de excavación sin entibación a valores máximos de 1,5 metros en suelos cohesivos firmes y 1 metro en suelos granulares, la implementación de sistemas de entibación mediante marcos de madera o metálicos con tableros laterales conforme progresa la excavación en profundidad. Se debe limitar a su vez el acopio de material en las zonas anexas al pozo que puedan añadir carga que descompensen el estado de equilibrio de terreno y aumenten la posibilidad de colapso.

Durante la fase operativa, el riesgo de seguridad más crítico se concentra en la caída accidental de usuarios, particularmente niños pequeños menores de 5 años, al interior del foso a través del orificio de defecación. La prevención efectiva de estos accidentes requiere rigurosamente que el diámetro del orificio de defecación no exceda los 250 milímetros, dimensión crítica establecida mediante estudios antropométricos que han demostrado que este valor representa el percentil 95 de la separación entre caderas de niños de 3 años, edad por debajo de la cual la caída resulta físicamente imposible si el orificio respeta esta limitación dimensional. La provisión de tapas sólidas que cubran completamente el orificio cuando la letrina no se encuentra en uso activo constituye una medida de seguridad adicional que debe promoverse sistemáticamente, particularmente en hogares con niños pequeños o personas con movilidad reducida susceptibles a pérdidas de equilibrio.

Se recalca también la importancia de una correcta ejecución de la solera, ya que se documentaron múltiples casos en los que el insuficiente espesor de la solera daba lugar a roturas

o fisuras que impedían su uso, ya fuera por condiciones dentro del Estado Límite Último que imposibilitaran su uso, o afecciones de Estado Límite de Servicio que crearan desconfianza e inseguridad en los usuarios, dando lugar al desuso de la letrina.

Desde la perspectiva sanitaria, las letrinas de foso simple presentan limitaciones intrínsecas derivadas de la ausencia de tratamiento efectivo de las excretas depositadas que comprometen su capacidad de interrumpir completamente las rutas de transmisión fecal-oral de enfermedades infecciosas.



Figura 15 Letrina inutilizada por rotura de solera. Itato

Fuente: Elaboración propia.

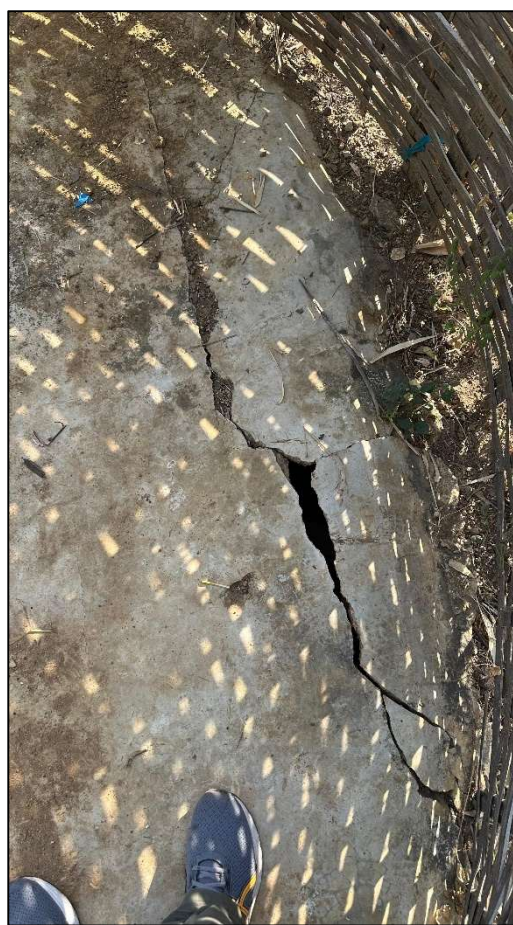


Figura 14 Detalle de patología

Fuente: Elaboración propia.

Costos

Los costos de implementación de letrinas de foso simple presentan variabilidad significativa determinada por múltiples factores contextuales que incluyen condiciones geotécnicas del terreno, nivel de acabado de la superestructura, costos locales de materiales de construcción y mano de obra, y el grado de participación comunitaria en procesos de autoconstrucción.

La estructura de costos desglosada revela que la excavación del foso representa típicamente entre 15% y 25% por ciento del costo total en suelos de excavabilidad moderada, incrementándose hasta 40% en suelos rocosos o fuertemente consolidados. Los materiales para revestimiento del foso constituyen entre 20% y 35% del costo total, con variaciones significativas según el material seleccionado: ladrillos cocidos representan típicamente el extremo superior de este rango, bloques de hormigón se sitúan en valores intermedios, y bloques de suelo-cemento fabricados localmente mediante procesos de autoconstrucción pueden reducir este componente hasta 15% del costo total. La losa de cobertura representa entre 15% y 25% del costo total cuando se ejecuta en hormigón armado con armadura convencional, pudiendo reducirse hasta 10% si se emplean tecnologías de ferrocemento con malla de gallinero como refuerzo.

La superestructura o caseta que proporciona privacidad y protección climática presenta la mayor variabilidad en términos de costos, oscilando entre 20% y 50% del costo total del sistema dependiendo fundamentalmente del nivel de acabado especificado y de los materiales empleados. Se priorizan materiales locales de bajo costo. En la *Figura 11* se puede apreciar cerramiento de bambú.

Los costos de mano de obra presentan igualmente variabilidad regional sustancial, representando entre 30% y 45% del costo total, pudiendo alcanzar hasta 60% del costo total. Los programas que incorporan esquemas de autoconstrucción con capacitación técnica a familias beneficiarias pueden reducir el componente de mano de obra contratada entre 40% y 70%, aunque requieren inversiones adicionales en capacitación, supervisión técnica y asistencia durante el proceso constructivo que típicamente representan entre 8% y 15% del costo total del programa.

El análisis de costo-efectividad comparativo con tecnologías alternativas de saneamiento revela que las letrinas de foso simple representan típicamente la opción de menor costo de inversión inicial entre todas las tecnologías disponible. Esta ventaja económica resulta determinante en contextos de extrema pobreza donde las familias beneficiarias disponen de capacidades de inversión limitadas y donde los presupuestos públicos destinados son muy bajos o nulos.

Consideraciones sociales y culturales

La aceptabilidad social y la apropiación cultural de las letrinas de foso simple constituyen factores determinantes del éxito sostenido de programas de saneamiento que trascienden ampliamente las consideraciones puramente técnicas de diseño y construcción. Existen estudios antropológicos por parte del Banco Mundial, en el Water and Sanitation Program sobre prácticas de saneamiento en comunidades rurales de África, Asia y América Latina donde han documentado que hasta 40% de las letrinas construidas mediante programas gubernamentales o de cooperación internacional permanecen sin uso regular o son abandonadas completamente dentro de los primeros 24 meses posteriores a su construcción, fenómeno atribuible fundamentalmente a incompatibilidades entre el diseño técnico estándar y las preferencias culturales, prácticas tradicionales de higiene, percepciones de dignidad y privacidad, y dinámicas de género que no fueron adecuadamente consideradas durante las fases de planificación e implementación.

Las consideraciones de género constituyen un aspecto social fundamental frecuentemente subvalorado en programas de saneamiento de orientación exclusivamente técnica. Las mujeres y niñas enfrentan vulnerabilidades específicas relacionadas con privacidad, seguridad física durante el uso nocturno, y necesidades diferenciadas durante períodos de menstruación que requieren diseños sensibles a estas realidades. Los estudios de evaluación participativa han documentado que las mujeres priorizan características de diseño tales como puertas sólidas con sistemas de cierre interno confiable que garanticen privacidad absoluta, iluminación interior natural o mediante aberturas estratégicamente ubicadas que permitan uso seguro durante horas nocturnas sin necesidad de iluminación artificial y ubicación de las letrinas en proximidad razonable a las viviendas típicamente no superior a 20 metros para reducir exposiciones durante desplazamientos nocturnos entre otras. La falta de atención a estas necesidades específicas de género se correlaciona estadísticamente con tasas de uso significativamente reducidas entre mujeres y niñas adolescentes, quienes en ausencia de instalaciones apropiadas pueden recurrir a prácticas de defecación al aire libre que perpetúan riesgos sanitarios y exposiciones a violencia sexual.

Se recalca de nuevo la importancia de la participación comunitaria efectiva en procesos de planificación, diseño y construcción de letrinas como un factor determinante de apropiación social y sostenibilidad operativa a largo plazo. Los programas que adoptan enfoques participativos mediante metodologías como el Saneamiento Total Liderado por la Comunidad (CLTS por sus siglas en inglés) han documentado tasas de uso sostenido superiores al 85 por

ciento comparadas con 45 a 60 por ciento en programas de provisión directa donde las comunidades asumen roles exclusivamente pasivos como beneficiarias. La participación activa en procesos de autoconstrucción genera simultáneamente apropiación psicológica del sistema construido, desarrollo de capacidades técnicas locales para mantenimiento y reparación, y reducción de costos monetarios que mejora la viabilidad económica particularmente en contextos de pobreza extrema donde las capacidades de inversión familiar resultan severamente limitadas.

Las dinámicas de equidad social en el acceso a saneamiento mejorado deben considerarse explícitamente en el diseño de programas, dado que las poblaciones más vulnerables social y económicamente frecuentemente enfrentan barreras múltiples para la adopción de tecnologías incluso de bajo costo como las letrinas de foso simple. Las familias encabezadas por mujeres, hogares con personas con discapacidad, poblaciones indígenas marginalizadas, y hogares en situación de pobreza extrema pueden requerir subsidios diferenciados, asistencia técnica intensificada, y diseños adaptados que consideren necesidades específicas de accesibilidad física para personas con movilidad reducida mediante rampas de acceso, barras de apoyo interior, y puertas de ancho incrementado que permitan paso de sillas de ruedas o dispositivos de asistencia.

Operación y mantenimiento

Las prácticas de operación y mantenimiento de letrinas de foso simple determinan fundamentalmente su funcionalidad sostenida, vida útil efectiva, nivel de protección sanitaria proporcionado, y aceptabilidad continuada por parte de los usuarios. A diferencia de tecnologías más complejas que requieren intervenciones técnicas especializadas, las letrinas de foso simple se caracterizan por requisitos de mantenimiento relativamente modestos que pueden ser ejecutados por los propios usuarios familiares mediante prácticas básicas de higiene y cuidado preventivo, aunque la efectividad de estas prácticas depende críticamente de la provisión de educación sanitaria apropiada y del desarrollo de capacidades locales mediante procesos de capacitación comunitaria.

El uso sistemático de la tapa que cubre el orificio de defecación cuando la letrina no se encuentra en uso activo constituye una práctica operacional fundamental que proporciona beneficios múltiples simultáneos: reducción drástica de olores percibidos en el entorno inmediato mediante confinamiento de gases y olores, control efectivo de la proliferación de moscas y otros

dípteros mediante interrupción del acceso al interior del foso para oviposición, mantenimiento de oscuridad en el interior del foso que reduce la temperatura interna y la actividad de insectos fotofílicos, y incremento de la seguridad mediante reducción del riesgo de caída accidental de niños o animales domésticos.

El monitoreo periódico del nivel de llenado del foso constituye una práctica de mantenimiento preventivo que permite planificar oportunamente las intervenciones de vaciado antes de que se alcance capacidad máxima que podría generar reboses, funcionamiento deficiente, u obligación de clausura precipitada de la instalación.

Las prácticas de uso apropiado constituyen un componente fundamental del mantenimiento operativo que depende críticamente de la educación sanitaria proporcionada a los usuarios. Las prácticas inadecuadas documentadas con mayor frecuencia incluyen el vertido de aguas de lavado de ropa, aguas residuales de cocina, o escorrentía de lluvia al interior del foso, prácticas que aceleran dramáticamente el llenado reduciendo la vida útil hasta en 60% respecto a escenarios de uso exclusivo para deposición de excretas.

La gestión del vaciado cuando el foso alcanza entre 80 y 90 por ciento de su capacidad máxima constituye la intervención de mantenimiento más significativa en términos de complejidad

Escalabilidad y replicabilidad

La capacidad de implementación masiva de letrinas de foso simple como solución de saneamiento para poblaciones rurales y periurbanas sin acceso a servicios mejorados depende fundamentalmente de factores de escalabilidad técnica, económica, institucional y social que determinan la viabilidad de extensión desde proyectos piloto de alcance limitado hacia programas nacionales o regionales que atiendan a millones de personas en plazos relativamente breves. La experiencia acumulada en programas de gran escala implementados durante las últimas tres décadas en países como Bangladesh, donde más de 40 millones de personas accedieron a saneamiento mejorado mediante provisión masiva de letrinas de foso entre 1990 y 2015; Etiopía, donde programas nacionales han construido más de 12 millones de letrinas entre 2005 y 2020 alcanzando tasas de cobertura superiores al 65 por ciento en áreas rurales; e India, donde la campaña Swachh Bharat Mission construyó más de 100 millones de letrinas entre 2014 y 2019, llegando a alcanzar el reconocimiento ODF (Open Defecation Free), proporciona

evidencia robusta sobre los factores determinantes del éxito en procesos de escalamiento masivo.

La disponibilidad local de materiales de construcción a precios accesibles y en volúmenes suficientes para abastecer demandas masivas constituye un prerrequisito fundamental de escalabilidad. Los programas exitosos han desarrollado estrategias de fortalecimiento de cadenas de suministro locales mediante identificación y capacitación de productores de materiales esenciales como ladrillos, bloques de hormigón, o componentes prefabricados de losas, establecimiento de redes de distribución descentralizadas que acercan materiales a comunidades rurales remotas reduciendo costos de transporte que pueden representar hasta 30% del costo final en áreas de accesibilidad limitada, y promoción de tecnologías de producción artesanal o semi-industrial de materiales como bloques de suelo-cemento que pueden fabricarse localmente empleando equipamiento simple y mano de obra no especializada, reduciendo dependencia de cadenas de suministro comerciales centralizadas y generando simultáneamente oportunidades de empleo y desarrollo económico local.

El desarrollo de capacidades técnicas a escala comunitaria mediante programas estructurados de capacitación de albañiles, maestros de obra, y promotores comunitarios constituye otro pilar fundamental de escalabilidad. Los modelos más efectivos han adoptado enfoques en cascada donde equipos técnicos centrales capacitan a capacitadores regionales que a su vez transfieren conocimientos y habilidades a constructores locales mediante sesiones prácticas de duración típica entre 3 y 5 días que combinan instrucción teórica sobre principios de diseño, dimensionamiento y selección de emplazamientos apropiados con demostraciones prácticas de técnicas constructivas específicas para excavación segura, instalación de revestimientos, construcción de losas armadas, y edificación de superestructuras.

Los mecanismos de financiamiento apropiados que consideren las severas restricciones de liquidez que enfrentan hogares en situación de pobreza constituyen un factor determinante de escalabilidad económica. Los enfoques basados exclusivamente en subsidios directos del 100 por ciento del costo de construcción, aunque políticamente atractivos, han demostrado limitaciones significativas en términos de sostenibilidad fiscal particularmente en contextos donde decenas de millones de hogares requieren acceso a saneamiento, generación de dependencia que reduce incentivos para mantenimiento apropiado, y problemas de focalización donde beneficios pueden capturarse por poblaciones no prioritarias. Los modelos alternativos que han demostrado mayor efectividad incluyen subsidios inteligentes focalizados que cubren entre 40% y 70% del costo de construcción para hogares clasificados en niveles de pobreza

extrema mediante sistemas de focalización geográfica o socioeconómica, requiriendo contrapartida familiar en dinero, trabajo, o materiales locales que genera apropiación y compromiso con el mantenimiento sostenido; esquemas de microcrédito sanitario mediante instituciones financieras de desarrollo o cooperativas comunitarias que proporcionan préstamos de pequeña escala con tasas de interés subsidiadas, plazos de pago entre 12 y 36 meses, y procedimientos simplificados de evaluación crediticia que reducen barreras de acceso para poblaciones rurales típicamente excluidas del sistema financiero común; y mecanismos de ahorro grupal donde familias participan en esquemas colectivos de ahorro durante períodos acumulando recursos propios que se complementan con subsidios o préstamos para alcanzar el costo total de construcción.

Los marcos institucionales que establecen roles y responsabilidades claras entre niveles de gobierno nacional, regional y local, agencias de cooperación internacional, organizaciones no gubernamentales, y estructuras comunitarias de base resultan esenciales para coordinación efectiva de programas de gran escala. Las experiencias exitosas han establecido unidades de coordinación nacional con mandato específico en saneamiento rural, dotadas de recursos humanos y financieros adecuados, que desarrollan normativas técnicas estandarizadas pero flexibles que permiten adaptación a diversidades regionales, sistemas de monitoreo y verificación que documentan avances hacia metas cuantitativas de cobertura, y mecanismos de asistencia técnica y financiera hacia gobiernos subnacionales que típicamente asumen responsabilidades de implementación directa. La descentralización efectiva de responsabilidades operativas hacia niveles municipales o distritales, combinada con fortalecimiento de capacidades técnicas y directivas de estos niveles mediante asistencia técnica sostenida, ha demostrado generar apropiación local, adaptación a contextos específicos, y sostenibilidad institucional superior comparada con modelos centralizados donde las decisiones técnicas y financieras se concentran en niveles nacionales distantes de las realidades locales.

La adaptabilidad tecnológica que permite ajustar diseños específicos a diversidades hidrogeológicas, culturales, y socioeconómicas sin comprometer principios técnicos fundamentales de protección sanitaria constituye un factor determinante de replicabilidad en contextos heterogéneos. Los programas que han alcanzado escalas masivas han desarrollado catálogos de diseños tipo que incluyen variaciones para diferentes profundidades de nivel freático, tipos de suelo, preferencias culturales sobre configuración de superestructuras, y capacidades económicas de hogares beneficiarios, proporcionando flexibilidad suficiente para adaptación local mientras mantienen estándares técnicos mínimos no negociables relativos a

distancias de seguridad, profundidades de excavación, y calidad de materiales críticos como la losa de cobertura. Esta estandarización flexible ha permitido simultáneamente reducir costos mediante economías de escala en producción de componentes prefabricados, simplificar procesos de capacitación técnica al limitar el rango de variaciones constructivas que los albañiles deben dominar, y facilitar supervisión de calidad mediante verificación de cumplimiento de especificaciones técnicas claramente definidas.

4.2.2. Letrina de foso mejorado y ventilado simple (VIP)

La letrina de pozo ventilado y mejorado (Ventilated Improved Pit) simple constituye una evolución técnica directa de la letrina de foso simple descrita en el apartado anterior, de la que se distingue exclusivamente por la incorporación de un sistema de ventilación forzada mediante tubo extractivo. Este único elemento diferencial genera, sin embargo, mejoras funcionales de notable relevancia en materia de control de olores y gestión entomológica, haciendo de la letrina VIP una de las tecnologías de saneamiento in situ más ampliamente recomendadas por organismos técnicos internacionales para contextos rurales y periurbanos en países en desarrollo. Según el Compendium of Sanitation Systems and Technologies del Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuática (Tilley et al., 2014), los VIP correctamente diseñados pueden mantenerse completamente libres de malos olores. Todos los parámetros de implantación, condicionantes hidrogeológicos, criterios de dimensionamiento del foso, selección de materiales de revestimiento y losa de cobertura, y consideraciones de equidad social son idénticos a los descritos para la letrina de foso simple; el lector debe referirse al apartado anterior para dichos aspectos. La presente ficha se centra exclusivamente en los elementos diferenciadores derivados del sistema de ventilación y en las implicaciones específicas que éste introduce sobre el funcionamiento, la aceptabilidad, el mantenimiento y los costos del sistema.

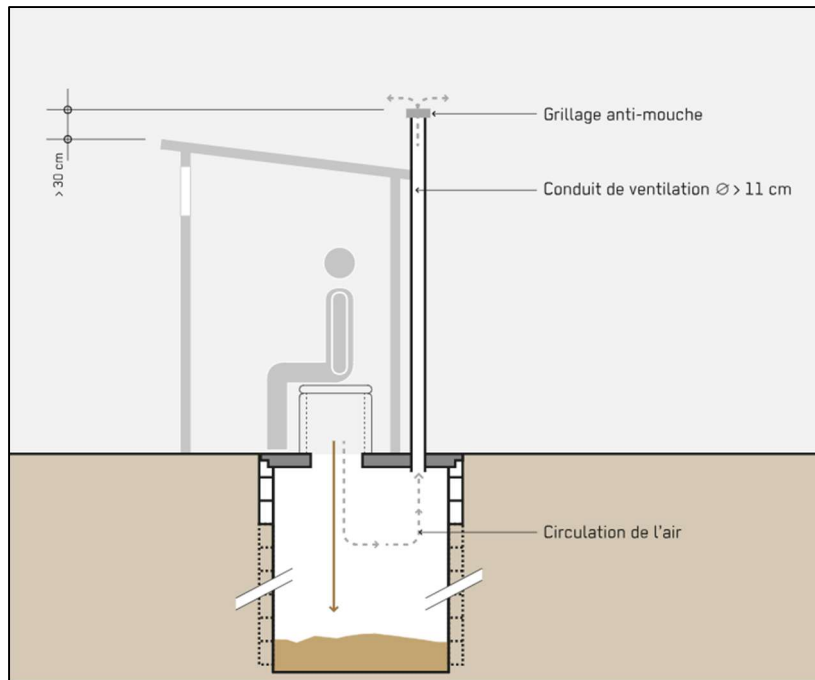


Figura 16 Esquema ilustrativo de letrina de foso simple.

Fuente: Emersan Compendium.

Condiciones óptimas de implantación

Las condiciones óptimas que determinan la viabilidad técnica de implantación de la letrina VIP son idénticas a las establecidas para la letrina de foso simple; de la misma manera que el marco normativo y regulatorio aplicable. El lector debe referirse íntegramente al apartado correspondiente a la letrina de foso simple para la evaluación de estos factores. Conviene señalar, no obstante, un matiz específico de la tecnología VIP en relación con las condiciones de viento del emplazamiento: el sistema de ventilación funciona de manera óptima en zonas con régimen de brisas constantes, siendo especialmente efectivo cuando la velocidad media del viento supera los 1,5 m/s. En emplazamientos con calmas frecuentes o presencia de barreras físicas como árboles o edificaciones en el entorno inmediato que interrumpan la circulación del aire, la eficacia del tubo de ventilación se reduce significativamente, debiendo adoptarse medidas compensatorias como el pintado exterior del tubo en negro para potenciar el efecto chimenea térmico, tal como recomienda el EMERSAN Compendium en su ficha técnica sobre esta tecnología.

Principio de funcionamiento del sistema de ventilación

El principio físico que se aplica al funcionamiento del sistema de ventilación de la letrina VIP descansa en dos fenómenos termodinámicos y aerodinámicos. El primero es el efecto chimenea, el cual se debe al diferencial de temperatura entre el aire interior del foso, donde la temperatura aumenta por la descomposición anaerobia de la materia orgánica, y el aire exterior más frío genera una diferencia de densidades que impulsa al aire caliente interior hacia el exterior a través del tubo de ventilación, creando una corriente ascendente continua denominada ventilación por flotabilidad. El segundo fenómeno es el principio de Bernoulli: el viento que circula sobre la sección transversal superior del tubo de ventilación genera una presión negativa en dicho extremo, produciendo un efecto de succión que induce activamente la extracción del aire maloliente del interior del foso hacia el exterior. Ambos efectos actúan sinérgicamente, aunque su contribución varía en función de las condiciones meteorológicas del emplazamiento; en días calmados sin viento predomina el efecto chimenea, mientras que en condiciones de brisa el efecto Bernoulli se convierte en el mecanismo dominante, según documentan Beverly A. Ryan y D. Duncan Mara en sus directrices preliminares para el diseño de tubos de ventilación de letrinas VIP publicadas por el Banco Mundial.

El mecanismo de control entomológico que distingue al VIP de la letrina de foso simple mejora también su funcionamiento: el aire que entra al sistema lo hace a través de la abertura de la losa, descendiendo hacia el interior del foso, estableciendo un flujo que transporta los olores hacia el tubo de ventilación y al exterior. Las moscas que eclosionan en el interior del foso vuelan, atraídas por la luz, hacia el extremo superior del tubo de ventilación, que constituye el punto de mayor luminosidad del sistema cuando el interior de la superestructura se mantiene en oscuridad, quedando atrapadas por la malla anti-insectos instalada en la parte superior del tubo, donde mueren por deshidratación y caen de regreso al foso. Este doble mecanismo, de prevención de salida por el orificio de defecación mediante el flujo descendente de aire, y captura en el tubo de ventilación por atracción a la luz, resulta en una reducción drástica de la presencia de moscas en el interior de la superestructura respecto a la letrina de foso simple no ventilada, siempre que se cumplan las condiciones de diseño que se detallan en los siguientes apartados.

En la mayoría de los foros se recomienda la ejecución de una superestructura para un funcionamiento ideal de la letrina, debido al principio de atracción de insectos hacia la luz a través del tubo mediante la oscuridad conseguida con la superestructura, pero es un elemento

que se descarta debido al gran incremento del coste total de la letrina, objetivo principal a reducir en este estudio.

Materiales de construcción

Los materiales para los componentes estructurales del foso, la losa de cobertura y la superestructura son idénticos a los descritos para la letrina de foso simple; el lector debe referirse a dicho apartado. El tubo de ventilación constituye el único elemento diferencial respecto a la letrina de foso simple, por lo que su correcto dimensionamiento, orientación, altura y mantenimiento determinan en su totalidad la eficacia diferencial del sistema VIP. Las especificaciones de la letrina VIP en el apartado de materiales se limitan al tubo de ventilación y a la malla anti-insectos. El EMERSAN Compendium enumera las opciones disponibles para la fabricación del tubo de ventilación, señalando que pueden emplearse tuberías de PVC o metal, mampostería de ladrillo o bloque construida como extensión de la superestructura, bambú hueco de diámetro suficiente para alcanzar los 110-150 mm de diámetro interno mínimo, o elementos similares disponibles localmente.

El PVC y el UPVC constituyen los materiales más ampliamente utilizados para tubos de ventilación de letrinas VIP por su disponibilidad en mercados de países en desarrollo, ligereza que facilita la manipulación e instalación, superficie interior lisa que reduce la resistencia al flujo de aire y permite trabajar con diámetros mínimos de 150 mm, y durabilidad frente a la humedad y agentes químicos del entorno del foso. En el documento “Guía 27” publicado en WEDC, por la Universidad de Loughborough (Reed, 2014) se especifica que los tubos de PVC o UPVC deben incorporar preferentemente un estabilizador que prevenga la degradación por radiación ultravioleta, dado que la exposición solar continua del tramo exterior del tubo puede generar fragilización progresiva del material y eventual fisuración en plazos de 3 a 7 años en climas de alta radiación solar si no se aplica la protección adecuada. La fijación del tubo a la pared de la superestructura debe realizarse mediante abrazaderas de acero galvanizado o alambre galvanizado que garanticen la estabilidad estructural del tubo frente a cargas laterales de viento, especialmente en los tramos que superan la altura de la cubierta de la superestructura. La junta inferior del tubo con la losa de cobertura debe ejecutarse mediante sellado perimetral con mortero de cemento-arena en sección troncocónica que garantice estanqueidad y evite el escape de gases y la entrada de aire por la junta, lo que cortocircuitaría el flujo de ventilación diseñado.

Los tubos construidos mediante mampostería de ladrillo o bloque pueden integrarse como extensión de la pared de la superestructura en disposición exterior, constituyendo una solución de mayor durabilidad y mejor integración estética aunque de mayor costo y complejidad constructiva. El tamaño mínimo interior para estos tubos de sección cuadrada o rectangular es de 200 mm de lado, según establece el WEDC (Reed, 2014), para compensar la mayor rugosidad superficial del ladrillo o bloque respecto al PVC liso. Los tubos fabricados localmente con materiales alternativos, tales como tela de saco tensada sobre malla de alambre y enlucida con mortero fino, o suelo de termitero que posee propiedades cementantes naturales, pueden alcanzar dimensiones interiores de 200 mm y durabilidades aceptables en contextos donde el acceso a PVC o materiales de mampostería resulte limitado o excesivamente costoso, aunque requieren inspecciones periódicas más frecuentes dada su menor resistencia mecánica y mayor susceptibilidad a la erosión por humedad.

Aplicabilidad

El ámbito de aplicabilidad técnica de la letrina VIP simple es en esencia el mismo descrito para la letrina de foso simple, al que se remite el lector para los aspectos relativos a densidad poblacional, condiciones hidrogeológicas y edafológicas, permanencia del asentamiento y restricciones regulatorias. Las condiciones específicas de aplicabilidad que difieren o complementan a las de la letrina de foso simple se concentran en el régimen de vientos del emplazamiento y en el contexto de emergencia humanitaria. En cuanto al primero, el EMERSAN Compendium establece que las letrinas VIP simples deben construirse en áreas con buen nivel de brisa para garantizar una ventilación eficaz, señalando que los emplazamientos con calmas frecuentes, fuerte sombreado por vegetación o presencia de edificaciones densas en el entorno inmediato reducen significativamente la eficacia diferencial respecto a la letrina de foso simple, pudiendo no justificar el costo adicional de la tubería de ventilación y la malla si el beneficio funcional resulta marginal.

La posibilidad de replicación rápida a escala se valora positivamente tanto a nivel de hogar como de vecindario, siempre que exista espacio suficiente. El EMERSAN Compendium señala también que en raras ocasiones se utilizan los VIP a modo de retretes comunales, dado que la gestión compartida genera frecuentemente un uso incorrecto y dificultades para el mantenimiento que comprometen la higiene de la instalación.

Una ventaja relevante de la letrina VIP respecto a alternativas más complejas es su compatibilidad con materiales de limpieza anal sólidos (papel, hojas, mazorcas u otros materiales

fibrosos) sin riesgo de obstrucción del sistema de ventilación, aspecto que la hace especialmente apropiada en contextos culturales donde el uso de agua para la limpieza anal no es la práctica predominante, tal como señala el WEDC Guide 27 (Reed, 2014). Del mismo modo, al no requerir agua para su funcionamiento, constituye una solución adecuada para regiones con escasez hídrica donde las tecnologías de sello de agua o inodoros de arrastre resultan inviables por indisponibilidad del recurso. Por el contrario, al igual que otras letrinas de pozo, esta opción no es adecuada para regiones con suelos rocosos o compactos que dificulten la excavación, ni para áreas que se inundan con frecuencia, restricciones ya desarrolladas en detalle en el apartado de la letrina de foso simple.

Aspectos ambientales y de sostenibilidad

Los riesgos ambientales de contaminación de acuíferos e impacto sobre la calidad del suelo son idénticos a los descritos para la letrina de foso simple, dado que el foso de la letrina VIP opera con los mismos principios de infiltración lateral y descomposición anaerobia. El lector debe referirse al apartado ambiental de la letrina de foso simple para la evaluación de estos aspectos. El elemento diferencial ambiental específico del sistema VIP es la emisión de gases al exterior a través del tubo de ventilación: a diferencia de la letrina de foso simple donde los gases de descomposición se acumulan en el espacio interior de la superestructura y pueden difundirse al entorno inmediato a través del orificio de defecación, el sistema VIP extrae activamente estos gases hacia el exterior a través del tubo y la malla, reduciendo la concentración de gases. Esta extracción dirigida mejora significativamente las condiciones sanitarias del espacio de uso para el usuario, aunque los gases son emitidos al exterior en el entorno inmediato de la instalación; dada la rápida dilución atmosférica y las pequeñas concentraciones involucradas, este aspecto no genera impactos ambientales medibles a escala local, pero debe considerarse en la planificación de la orientación del tubo en relación con viviendas vecinas.

Un aspecto ambiental de relevancia específica es la contribución de las letrinas de pozo a la emisión de metano (CH_4), un gas de efecto invernadero de potencia 28 veces superior al CO_2 en horizonte temporal de 100 años según el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014). El sistema de ventilación del VIP incrementa la aireación del foso respecto a la letrina simple, lo que potencialmente favorece condiciones aerobias en las capas superiores del material acumulado, reduciendo parcialmente la generación de metano por fermentación anaerobia. No obstante, no se han identificado datos cuantitativos verificados en fuentes oficiales que cifren

con precisión la diferencia de emisiones de metano entre letrinas VIP y letrinas de foso simple en condiciones operativas reales.

Seguridad y salud

Los aspectos de seguridad estructural durante la construcción, los riesgos de caída de usuarios al interior del foso, y las consideraciones sobre la ejecución de la losa de cobertura son idénticos a los descritos para la letrina de foso simple, aplicándose íntegramente las mismas medidas preventivas y criterios dimensionales del orificio de defecación. La letrina VIP introduce consideraciones específicas de salud y seguridad relacionadas con el sistema de ventilación y sus implicaciones sanitarias diferenciales. El EMERSAN Compendium establece que una letrina VIP simple utilizada y gestionada correctamente puede ofrecer un retrete limpio, cómodo y aceptable, y que la presencia de moscas y malos olores se reduce de manera significativa en comparación con los pozos sin ventilación, aunque matiza que los riesgos para la salud asociados a la presencia de moscas no se eliminan por completo mediante la ventilación.

La correcta evaluación de las propiedades del terreno, específicamente la permeabilidad del suelo y el nivel del agua subterránea, es esencial para limitar la exposición de fuentes de agua a contaminación microbiológica, debiendo aplicarse los criterios de distanciamiento establecidos en el marco normativo descrito en el apartado de la letrina de foso simple.

Costos

La estructura de costos de la letrina VIP simple es idéntica a la de la letrina de foso simple en todos sus componentes, excavación, revestimiento del foso y losa de cobertura, a excepción del sistema de ventilación, que constituye el único componente adicional. El Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM, 2019), señala de manera genérica que las letrinas VIP son ligeramente más caras que las letrinas de pozo simples, dado que la construcción requiere material adicional (principalmente el tubo de ventilación) y que el diseño ventilado necesita una superestructura techada y oscurecida. Esta diferencia de costo, que en términos porcentuales sobre el costo total del sistema puede estimarse orientativamente entre 5% y 15% en función del material elegido para el tubo, incremento mayor para mampostería de ladrillo, menor para PVC, no ha sido cuantificada de manera sistemática en fuentes oficiales con datos estadísticos rigurosos para múltiples contextos geográficos.

En términos de costos de ciclo de vida, la letrina VIP introduce costos de operación y mantenimiento adicionales respecto a la letrina de foso simple, derivados principalmente de la inspección y limpieza periódica de la malla anti-insectos, que puede obstruirse con polvo, restos de moscas muertas y arañas en plazos de semanas en entornos áridos, y de la eventual sustitución de la malla cuando su deterioro comprometa la función de barrera, con frecuencias variables entre 1 y 5 años según el material empleado.

Consideraciones sociales y culturales

Las consideraciones de aceptabilidad social, participación comunitaria, sensibilidad de género y equidad en el acceso son idénticas a las descritas en detalle para la letrina de foso simple, siendo especialmente válidas las observaciones sobre tasas de abandono de hasta el 40% documentadas por el Banco Mundial en contextos rurales de África, Asia y América Latina, las exigencias de diseño sensible al género, y la superioridad demostrada de los enfoques participativos tipo CLTS en la generación de apropiación y uso sostenido. El EMERSAN Compendium añade, de manera específica para las letrinas VIP, que el diseño debe analizarse previamente con la comunidad y debe reflejar las preferencias de los usuarios locales, incluyendo la elección entre posición de cuclillas o sentado, las prácticas de limpieza anal, la orientación y posicionamiento de la estructura, el uso de pantallas o cerramientos específicos, y la accesibilidad para todos los grupos de usuarios incluyendo hombres, mujeres, niños, adultos mayores y personas con discapacidad.

Un aspecto social diferencial específico de la letrina VIP respecto a la de foso simple es la tensión funcional entre el requisito de oscuridad interior para el correcto funcionamiento del mecanismo entomológico y las preferencias culturales de los usuarios por espacios iluminados percibidos como más seguros y limpios. El WEDC Guide 27 (Reed, 2014) documenta que algunos usuarios, especialmente niños y adultos en contextos donde la presencia de animales como serpientes o escorpiones en la superestructura es una preocupación real, tienden a modificar la superestructura para incrementar la iluminación, comprometiendo la eficacia del sistema. Este fenómeno debe anticiparse durante la fase de diseño y comunicación comunitaria, explicando claramente a la comunidad el vínculo causal entre la oscuridad interior y el control de moscas, y buscando soluciones de diseño como el diseño espiral o el uso de rejillas en ventanas que permitan la circulación de aire con mínima entrada de luz, minimizando la tentación de modificaciones espontáneas que comprometan la funcionalidad. Las posibles funciones y responsabilidades relacionadas con las tareas de operación y mantenimiento deben acordarse

desde el inicio del programa y vincularse estrechamente con las actividades de promoción de higiene, para garantizar que la comunidad comprenda y asuma la responsabilidad del mantenimiento de la malla y la verificación periódica del funcionamiento de la ventilación.

Operación y mantenimiento

Las prácticas generales de operación y mantenimiento del foso (monitoreo del nivel de llenado y prácticas de uso apropiado) son idénticas a las descritas para la letrina de foso simple y el lector debe referirse a dicho apartado. El sistema de ventilación introduce requisitos específicos de mantenimiento adicionales que, si bien modestos en términos de esfuerzo y costo, son críticos para la funcionalidad diferencial del VIP. El EMERSAN Compendium identifica entre las tareas de operación y mantenimiento de la letrina VIP la realización de reparaciones menores y el control de los niveles de llenado del foso, así como de manera específica, la eliminación periódica de moscas muertas, polvo y otras suciedades de la malla anti-insectos para garantizar la correcta circulación del aire.

La frecuencia de limpieza de la malla debe adaptarse a las condiciones del entorno, siendo significativamente más frecuente en contextos áridos con alta concentración de partículas en suspensión o durante periodos de viento que transportan grandes cantidades de polvo. El EMERSAN Compendium (s.f.) señala también que en muchos casos los pozos se usan de manera incorrecta para desechar residuos sólidos, disminuyendo la vida útil del foso, por lo que las medidas de concienciación sobre el uso correcto deben formar parte de los programas de instalación.

Escalabilidad y replicabilidad

Los factores de escalabilidad técnica, económica, institucional y social son en su mayor parte equivalentes a los descritos para la letrina de foso simple, siendo de aplicación directa las estrategias de fortalecimiento de cadenas de suministro local, desarrollo de capacidades técnicas en cascada, mecanismos de financiación y marcos institucionales de coordinación a distintos niveles. La letrina VIP introduce, sin embargo, elementos adicionales de complejidad en los procesos de escalamiento que merecen consideración específica. El mayor requerimiento técnico del sistema de ventilación que exige, como se ha detallado, una correcta selección e instalación del tubo, demanda un nivel de capacitación de los constructores locales ligeramente

superior al necesario para la letrina de foso simple, no siendo tampoco de una dificultad excesiva. Los procesos de capacitación en cascada deben incorporar explícitamente estos contenidos específicos de la letrina VIP, estimándose que las sesiones prácticas de 3 a 5 días descritas para la letrina de foso simple resultan igualmente adecuadas si incluyen una demostración práctica de instalación del sistema de ventilación y del procedimiento de ensayo de humo.

La disponibilidad de tuberías de PVC de los diámetros especificados y de malla anti-insectos de las especificaciones correctas en mercados locales de áreas rurales remotas puede constituir un cuello de botella de escalabilidad que no existe en la letrina de foso simple, cuya construcción puede realizarse íntegramente con materiales pétreos, cerámicos y cementosos habitualmente disponibles incluso en mercados rurales de acceso limitado. Los programas de escalamiento de la letrina VIP deben contemplar estrategias específicas de fortalecimiento de las cadenas de suministro de estos materiales específicos, incluyendo identificación de proveedores en niveles de mercado urbano accesibles, establecimiento de stocks de malla en puntos de distribución descentralizados, y desarrollo de alternativas de fabricación local del tubo de ventilación con materiales disponibles localmente como bambú o tela de saco enlucida para contextos de máxima remotidad donde la cadena de suministro comercial no puede garantizarse de manera fiable. La experiencia acumulada en programas nacionales de escalamiento como el Blair Research Laboratory de Zimbabue, proporciona evidencia robusta sobre la viabilidad de implementación masiva del sistema VIP mediante modelos de autoconsumo y cadenas de suministro locales, constituyendo un referente técnico de primera relevancia para cualquier programa de escalamiento de esta tecnología.

4.2.3. Sistema seco de pozos gemelos

El sistema seco de pozos gemelos constituye una evolución funcional respecto a las tecnologías de foso simple y VIP simple descritas en los apartados anteriores, a las que comparte todos los principios de implantación, dimensionamiento del foso, selección de materiales y consideraciones de seguridad estructural, sin que sea necesario repetir dichos contenidos en la presente ficha. El elemento diferencial que define esta tecnología es el empleo de dos fosos independientes que se utilizan de manera estrictamente alternada, de forma que mientras uno está en servicio activo para uso de defecación, el otro permanece sellado en reposo, permitiendo que el material acumulado complete un proceso de degradación, deshidratación y reducción parcial de patógenos que transforma las excretas en un producto humus manejable y de menor carga infecciosa que los lodos frescos. El EMERSAN Compendium identifica bajo esta denominación dos variantes tecnológicas con principios de funcionamiento análogos pero diferencias de diseño, gestión y producto final significativas: el Pozo VIP doble, que opera con la misma lógica funcional que el VIP simple descrito en el apartado anterior pero con dos fosos de mayor profundidad que producen lodo estabilizado, y la Fosa Alternativa (FA), diseñada específicamente para la producción de humus de alta calidad agronómica mediante la adición sistemática de material orgánico de cobertura.

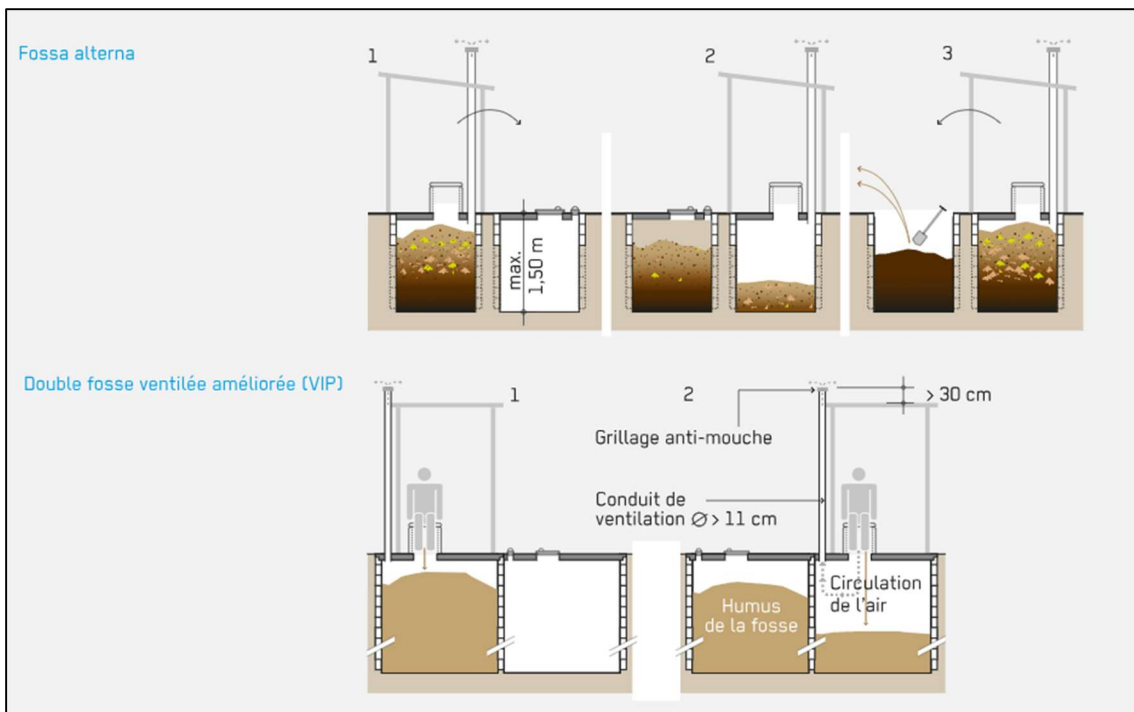


Figura 17 Esquema ilustrativo de sistema seco de pozos gemelos. Letrina doble VIP y Fosa Alternativa

Fuente: Emersan Compendium

Condiciones de implantación

Las condiciones de implantación aplicables son equivalentes a los descritos para la letrina de foso simple y para el VIP simple, a cuyos apartados se remite íntegramente al lector. Existen, no obstante, dos matices diferenciales de relevancia técnica que deben señalarse. El primero es que la variante de Fosa Alternada presenta una compatibilidad comparativamente mayor con zonas de nivel freático elevado o propensas a inundaciones respecto al VIP doble, dado que sus fosos pueden construirse por encima del nivel del terreno natural al ser mucho menos profundos (profundidad máxima de 1,5 m frente a los 3 m del VIP doble), tal como indica el EMERSAN Compendium. Esta posibilidad de construcción elevada amplía el rango de emplazamientos técnicamente viables para la Fosa Alternada respecto a las tecnologías de foso más profundo, aunque no elimina la necesidad de evaluación de los riesgos de infiltración en el nivel saturado, que debe realizarse con los mismos criterios de separación vertical mínima establecidos en el apartado de la letrina de foso simple. El segundo matiz es que el sistema de pozos gemelos requiere el doble de superficie de terreno que las tecnologías de foso simple, aspecto que puede condicionar su viabilidad en concesiones individuales de dimensiones reducidas o en contextos periurbanos con alta presión sobre el suelo disponible, no siendo aplicables a nuestro caso de estudio.

Principio de funcionamiento del sistema alternado

El principio operativo que distingue al sistema de pozos gemelos de las tecnologías de foso único se ubica en la separación temporal entre la fase de llenado activo y la fase de reposo anaerobio-aerobio de cada foso, separación que genera condiciones de tiempo y ambiente fisicoquímico favorables para la degradación progresiva del contenido acumulado. Cuando el primer foso alcanza entre el 75% y el 80% de su capacidad útil, se sella herméticamente, comenzando la fase activa del segundo foso. Durante todo el tiempo que el segundo foso tarda en llenarse, el primero permanece sellado en reposo. El EMERSAN Compendium establece que este ciclo de alternación dura generalmente entre 6 y 24 meses en función del volumen de los fosos y del número de usuarios, período durante el cual el material del foso en reposo experimenta los procesos descritos en el apartado siguiente.

Un requisito operativo absolutamente crítico, reiterado de manera consistente por todas las fuentes técnicas consultadas, es la utilización estrictamente secuencial y nunca simultánea de los dos fosos: si ambos fosos se emplean al mismo tiempo, el sistema pierde su funcionalidad

diferencial y opera como dos fosos simples independientes sin beneficio de la fase de reposo. El SSWM señala expresamente que la tecnología de Fosa Alterna solo funciona correctamente si los dos fosos se utilizan de manera secuencial. Esta condición implica que el foso en reposo debe quedar cubierto de forma segura y permanente durante toda la fase de alternación, mediante una tapa o sellado que impida al mismo tiempo el acceso accidental de personas y animales, la entrada de escorrentía pluvial que comprometería los procesos de desecación del contenido, y la percepción por parte de los usuarios de que el foso en reposo podría volver a utilizarse.

Procesos de degradación y reducción de patógenos en el foso en reposo

La comprensión de los procesos que ocurren en el foso sellado durante la fase de reposo es fundamental para entender la ventaja sanitaria del sistema de pozos gemelos respecto al foso simple y para establecer el período mínimo de reposo necesario antes de proceder al vaciado y reutilización segura del material. Según el Global Water Pathogen Project (Soller, 2019), el tiempo de residencia en el foso es el factor con mayor impacto sobre la reducción de patógenos, dada la realidad de condiciones desfavorables de temperatura y humedad que caracterizan el interior de los pozos. Durante la fase de reposo se producen simultáneamente varios procesos: infiltración de la fracción líquida hacia el suelo circundante, que reduce el contenido de humedad del material sólido y crea condiciones progresivamente más secas; degradación anaerobia de la materia orgánica, que reduce el volumen del material acumulado; reducción de la viabilidad de patógenos por desecación y, en el caso específico de la Fosa Alterna con adición de material orgánico, degradación aerobia parcial favorecida por la estructura porosa del material añadido, que genera un producto humus con características físicoquímicas más favorables.

En cuanto a la cuantificación de la reducción de patógenos, el Global Water Pathogen Project (Soller, 2019) indica que un período de almacenamiento de 1 a 2 años debería reducir el contenido de patógenos, aunque advierte de manera explícita que en muchas situaciones se recomienda tratamiento adicional.

Variante 1: VIP Doble

Características diferenciales de diseño

La letrina VIP doble se construye con los mismos criterios de diseño, dimensionamiento y materiales que la letrina VIP simple descrita en el apartado anterior, al que se remite al lector para todos esos aspectos, añadiendo únicamente la duplicación del foso de recolección. El EMERSAN Compendium indica que cada foso debe disponer de su propio sistema de ventilación independiente, de modo que cuando la interfaz de usuario se encuentre sobre uno de los fosos, el tubo de ventilación activo sea el correspondiente a ese foso, garantizando el funcionamiento correcto del mecanismo de extracción de olores y captura de moscas descrito en el apartado de la letrina VIP. El foso en reposo debe permanecer sellado e idealmente sin tubo de ventilación activo para minimizar la entrada de aire y humedad que podría interferir con los procesos de desecación del contenido. La profundidad de los fosos del VIP doble puede alcanzar los 3 metros, frente al máximo de 1,5 metros de la Fosa Alternativa, lo que permite ciclos de alternación más prolongados antes de que se alcance la capacidad máxima de cada foso y sea necesario el traslado de la interfaz de usuario.

La superestructura puede diseñarse de dos maneras: como estructura fija permanente que cubre ambos fosos con orificio de defecación en posición central o lateral y placa de cobertura desplazable entre los dos fosos sin necesidad de mover la superestructura; o como estructura portable que se desmonta y traslada físicamente de un foso al otro cuando se produce el cambio de alternación, opción de mayor flexibilidad constructiva pero que exige una superestructura suficientemente ligera para permitir el traslado por los propios usuarios sin equipamiento especial.

Variante 2: Fosa Alternativa

Concepto y diferencias fundamentales respecto al modelo VIP doble

La Fosa Alternativa constituye una variante tecnológica que comparte con el modelo VIP doble el principio de alternancia de fosos, pero se diferencia de él en el objetivo del proceso que se promueve en el foso en reposo y, consecuentemente, en los materiales añadidos, la profundidad de los fosos, el producto de salida generado y el potencial de reutilización agronómica de dicho producto. Mientras la letrina VIP doble está concebida para coleccionar, almacenar y tratar

parcialmente las excretas generando un lodo estabilizado de características similares al humus pero con una carga residual de patógenos no despreciable, la Fosa Alterna está específicamente diseñada para producir un material humus de alta calidad agronómica denominado eco-humus o humus de fosa, aprovechable como acondicionador del suelo y fertilizante orgánico, mediante la incorporación sistemática de material orgánico de cobertura que activa procesos de compostaje aerobio en el interior del foso, según establece el SSWM. Esta orientación hacia la recuperación de recursos diferencia conceptualmente a la Fosa Alterna de todas las tecnologías de saneamiento descritas hasta este punto, inscribiéndola en el paradigma de saneamiento ecológico o ecosan, que reconoce las excretas humanas como recurso valioso de nutrientes en lugar de residuo a eliminar.

Profundidad y dimensionamiento específico

A diferencia del modelo VIP doble, cuya profundidad puede alcanzar los 3 metros, los fosos de la Fosa Alterna se construyen a una profundidad máxima de 1,5 metros, criterio establecido de manera compartida por el EMERSAN Compendium, el SSWM, y el WEDC. Esta restricción de profundidad responde a múltiples razones técnicas: primera, facilitar las operaciones de vaciado manual del material compostado, que dada la adición de material orgánico seco resulta relativamente suelto y manejable a diferencia del lodo compactado de pozos profundos. En segundo lugar, mantener los fosos por encima de los niveles de aguas freáticas estacionales más elevados, requisito especialmente importante en la Fosa Alterna dado que la inundación de los fosos eliminaría las condiciones aerobias necesarias para el proceso de compostaje; y tercera, facilitar la construcción y el revestimiento completo de los fosos, que en la Fosa Alterna debe realizarse hasta el fondo dado que los fosos se reutilizan indefinidamente y requieren integridad estructural duradera. El SSWM señala que un foso de Fosa Alterna con profundidad de 1 a 1,5 metros puede ser utilizado por una familia de seis personas durante un año, dato que coincide con el ciclo de alternación anual característico de esta tecnología.

Material orgánico de cobertura: función y especificaciones

El requisito operativo definitorio de la Fosa Alterna es la adición sistemática de material orgánico seco al foso tras cada acto de defecación (no tras la micción). El EMERSAN Compendium especifica que los materiales adecuados incluyen cenizas y hojarasca, mientras que el SSWM amplía la lista a tierra, cenizas y/o hojas. Las funciones específicas de cada tipo de material de

cobertura son diferenciadas: el suelo y las hojas introducen una variedad de organismos como lombrices, hongos y bacterias que facilitan el proceso de degradación, y aumentan el espacio poroso que permite condiciones aerobias en el interior del foso; las cenizas ayudan a controlar las moscas, reducen los olores y hacen la mezcla ligeramente más alcalina, condición que favorece la inactivación de algunos patógenos como E. coli (sensible a pH elevado), según documenta el SSWM.

Un aspecto técnico de importancia crítica es la incompatibilidad del agua con el proceso de la Fosa Alterna; la adición de agua favorece el desarrollo de insectos y patógenos, llena los espacios porosos y priva a las bacterias aerobias del oxígeno necesario para la degradación, comprometiendo el proceso de compostaje e invirtiendo las condiciones de aerobias a anaerobias, tal como señala el SSWM. El producto final extraído del foso en reposo tras el período de compostaje es el eco-humus o humus de fosa, un material de aspecto y características similares a la tierra oscura compostada, con contenido significativo de nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica aprovechable como fertilizante y acondicionador del suelo agrícola. El EMERSAN Compendium señala que el humus de pozo puede utilizarse como fertilizante o acondicionador del suelo como uno de los puntos fuertes de la tecnología. En el estudio *Plant Trials Using Fossa Alterna Humus Morgan* (Morgan, 2004) se documentó ensayos agronómicos con el humus proveniente de Fosa Alterna, demostrando mejoras en el rendimiento de cultivos en parcelas tratadas con este material respecto a parcelas testigo sin aportación orgánica. El tiempo óptimo de compostaje antes del vaciado es superior a 12 meses; el material puede excavararse antes, a los 6 meses, pero en ese caso es preferible trasladarlo a una zanja donde se plantará un árbol en lugar de aplicarlo directamente sobre cultivos de consumo humano.

Aplicabilidad

El sistema de pozos gemelos, en sus dos variantes, comparte con la letrina de foso simple y con el VIP simple el ámbito de aplicabilidad general en áreas rurales y periurbanas de baja a media densidad poblacional con condiciones hidrogeológicas y edafológicas favorables a los sistemas de infiltración, descritos en detalle en los apartados de aquellas tecnologías. El EMERSAN Compendium añade consideraciones específicas para el sistema de pozos gemelos: los sistemas de doble pozo son adecuados cuando existe suficiente espacio y potencial de reutilización del humus de pozo generado, siendo más adecuados para entornos rurales y periurbanos y para comunidades que se sientan cómodas con la manipulación y reutilización de la materia fecal.

Esta última condición de aceptabilidad cultural es especialmente relevante para la Fosa Alternativa, cuya viabilidad depende críticamente de que los usuarios valoren el eco-humus como recurso agrícola y estén dispuestos a manejarlo tras el período de compostaje. En contextos donde el contacto con excretas, aunque compostadas, sea culturalmente inaceptable o genere resistencia social significativa, el beneficio agronómico potencial no se materializará y la tecnología no logrará el impacto esperado.

Una ventaja aplicativa específica frente a las tecnologías de foso único es que el sistema de doble pozo permite, por definición, la reutilización indefinida del emplazamiento sin necesidad de relocalización o vaciado con equipamiento especializado: una vez vaciado el foso en reposo mediante extracción manual del material compostado, puede volver a ponerse en servicio activo cuando el segundo foso alcanza su capacidad máxima, generando un ciclo cerrado de alternancia que puede prolongarse durante décadas si las estructuras de revestimiento y las losas de cobertura mantienen su integridad. El Global Water Pathogen Project, señala que dependiendo del diseño y la frecuencia de uso, los pozos de letrinas pueden usarse durante 10 a 30 años, aunque muchos se usan durante menos de 5 años antes de llenarse y necesitar vaciado o cobertura, contexto en el que el sistema de doble pozo con ciclo de alternación ofrece una vida útil efectiva claramente superior a la del foso simple.

Aspectos ambientales y de sostenibilidad

Los riesgos ambientales de contaminación de acuíferos por infiltración de excretas son equivalentes a los descritos en el apartado de la letrina de foso simple, aplicándose los mismos criterios de distanciamiento horizontal y vertical respecto a fuentes de abastecimiento. El sistema de pozos gemelos no elimina este riesgo durante la fase activa de cada foso, y el foso en reposo, cuyo contenido presenta mayor grado de desecación, genera menor presión de infiltración de la fracción líquida que un foso activo, aunque no la elimina completamente. Se aplican las mismas distancias de seguridad y restricciones de zonas de recarga acuífera establecidas para la letrina de foso simple.

La dimensión ambiental diferencial y más relevante del sistema de pozos gemelos es la posibilidad de valorización agronómica del material extraído del foso en reposo, aspecto que introduce el sistema en el ciclo de recuperación de nutrientes. Para la Fosa Alternativa, el proceso de compostaje aerobio activo durante el período de reposo genera un producto de mejor calidad

sanitaria, aunque el Global Water Pathogen Project advierte que el tratamiento adicional sigue siendo necesario en muchas situaciones para garantizar la eliminación completa de helmintos.

La generación de gases de efecto invernadero es similar a la descrita para las tecnologías de foso simple: el foso activo opera en condiciones esencialmente anaerobias y genera metano como subproducto de la descomposición, mientras que el foso en reposo tiende hacia condiciones más aerobias (especialmente en la Fosa Alternativa con adición de material poroso) que reducen la producción de metano. No se han identificado en las fuentes oficiales consultadas datos cuantitativos sobre diferencial de emisiones de GEI entre el sistema de doble pozo y el foso simple.

Seguridad y salud

Los aspectos de seguridad estructural durante la construcción y los riesgos operativos de caída al interior del foso son idénticos a los descritos para la letrina de foso simple. La duplicación del número de fosos introduce un riesgo adicional: el foso en reposo y sellado representa un punto de riesgo potencial de caída o colapso de la cobertura si el sellado no se ejecuta con suficiente solidez, debiendo garantizarse que la tapa o losa de cierre del foso en reposo soporte las cargas dinámicas asociadas al tránsito de personas en el entorno inmediato.

El aspecto de salud más específico del sistema de pozos gemelos es la gestión del material extraído del foso en reposo y los riesgos de exposición a patógenos residuales durante las operaciones de vaciado. El EMERSAN Compendium establece que mantener el contenido sellado dentro del pozo durante un plazo mínimo de un año hace que el humus de pozo sea más seguro y fácil de manipular. El uso de equipo de protección individual, tales como guantes, botas de goma y mascarilla, durante las operaciones de extracción del material compostado es una medida preventiva que debe promoverse sistemáticamente, independientemente del período de reposo transcurrido y del aspecto visual del material extraído.

Otras preocupaciones de salud incluyen la posibilidad de que el lixiviado contamine el agua subterránea, que los pozos fallen o se desborden durante las inundaciones, y que la ventilación (en el caso del modelo VIP doble) no elimine por completo los riesgos de las moscas para la salud, aspectos ya tratados en los apartados correspondientes a la letrina de foso simple y al VIP.

Costos

La estructura de costos del sistema de pozos gemelos incorpora la duplicación de los componentes del foso respecto a las tecnologías de foso único. El EMERSAN Compendium establece que por lo general los costos de construcción de los sistemas secos de pozos gemelos son el doble de los sistemas de pozos simples. Esta estimación del orden del doble del costo de construcción es coherente con la estructura de costos de los componentes: la excavación de dos fosos duplica el componente de excavación (que para la letrina de foso simple representa entre el 15% y el 25% del costo total en suelos de excavabilidad moderada, como se indicó en el apartado correspondiente), y el revestimiento de dos fosos duplica el componente de materiales de revestimiento (entre el 20% y el 35% del costo total en la letrina de foso simple).

Consideraciones sociales y culturales

Las consideraciones generales de aceptabilidad social, participación comunitaria, sensibilidad de género y equidad en el acceso descritas en los apartados de la letrina de foso simple y del VIP son aplicables al sistema de pozos gemelos. Se introduce consideraciones sociales específicas para esta tecnología: los usuarios deben conocer las ventajas del sistema seco de pozos gemelos y deben estar dispuestos a operarlo y mantenerlo, y el sistema podría fallar si los usuarios no valoran los beneficios que aporta. Este punto es un factor crítico de éxito que va más allá de la aceptabilidad básica de uso de la letrina: el sistema de pozos gemelos requiere una comprensión activa del ciclo de alternancia, la disposición a sellar y dejar de usar el foso inicial cuando éste alcanza su capacidad, y la voluntad de manejar el material del foso en reposo tras el período de compostaje. Ninguna de estas conductas puede asumirse sin un proceso estructurado de educación sanitaria y apropiación comunitaria. *Recalco la importancia de la apropiación comunitaria de las infraestructuras, ya que uno de los principales problemas encontrados durante mi estancia en Senegal es el abandono de estas durante el periodo de operación y mantenimiento, llevando al abandono o inutilización de las infraestructuras.*

La aceptabilidad de la reutilización del eco-humus como fertilizante es el factor social más específico y determinante del éxito de la Fosa Alterna frente al VIP doble. El SSWM señala que los usuarios podrían no entender la diferencia entre la Fosa Alterna y el VIP doble, aunque si se les da la oportunidad de usar una, deberían apreciar las ventajas. Esta observación sugiere que la comunicación sobre las diferencias entre las dos variantes y la demostración práctica del producto final obtenido constituyen herramientas de apropiación más eficaces que la mera

explicación teórica. Como se menciona previamente, en contextos donde el material fecal, aunque esté compostado, sea culturalmente percibido como tabú o contaminante independientemente de su grado de transformación, la ventaja agronómica de la Fosa Alternativa puede resultar insuficiente para superar la resistencia social a su manipulación.

Operación y mantenimiento

Las prácticas generales de operación y mantenimiento del foso activo son las mismas que las descritas para el VIP simple y la letrina de foso simple, a cuyos apartados se remite al lector. Las tareas específicas adicionales del sistema de pozos gemelos incluyen el sellado del foso activo una vez que se llena y su vaciado antes de reutilizarlo, y en el caso de las Fosas Alternativas, el suministro permanente de material orgánico seco para añadir al foso tras cada uso. Esta última tarea constituye quizás el mayor requerimiento conductual diferencial de la Fosa Alternativa respecto a cualquier otra tecnología de saneamiento: cada acto de defecación debe ir seguido de la adición manual de una pequeña cantidad de material de cobertura (tierra, cenizas, hojas), práctica que debe habituarse como parte del ritual de uso de la letrina y que requiere la disponibilidad permanente de un recipiente con material de cobertura en el interior o entorno inmediato de la superestructura. Si el suministro de material de cobertura se interrumpe por indisponibilidad, desabastecimiento o simple olvido, el proceso de compostaje se degrada hacia condiciones anaerobias con generación de olores y proliferación de moscas, perdiendo la Fosa Alternativa su ventaja funcional respecto a las alternativas.

El sellado del foso al completarse su llenado debe realizarse de manera que garantice hermeticidad frente a la entrada de agua de lluvia que comprometería los procesos de desecación y frente al acceso de vectores y animales.

Escalabilidad y replicabilidad

Los factores de escalabilidad son en su mayor parte equivalentes a los descritos para la letrina de foso simple y VIP simple. La mayor complejidad del ciclo operativo del sistema de pozos gemelos (especialmente de la Fosa Alternativa con adición de material orgánico) introduce requerimientos adicionales de capacitación de los usuarios y supervisión técnica que deben incorporarse explícitamente en los programas de escalamiento.

La viabilidad de escalamiento masivo del sistema de pozos gemelos queda condicionada principalmente por el requisito de espacio adicional señalado por el EMERSAN Compendium, que puede resultar limitante en contextos periurbanos densificados donde la disponibilidad de terreno por concesión es reducida. Los modelos de escalamiento más recomendables para esta tecnología son aquellos orientados a asentamientos rurales permanentes con disponibilidad de tierra, práctica agrícola que haga valorable el eco-humus, y acceso a materiales de cobertura orgánica en cantidad suficiente para el suministro continuo que demanda la Fosa Alterna.

4.2.4. Retrete basado en contenedores

El retrete basado en contenedores (en adelante CBS, acrónimo del inglés Container-Based Sanitation) representa una ruptura conceptual completa con todas las tecnologías de saneamiento in situ descritas en los apartados anteriores al eliminar cualquier componente fijo enterrado en el terreno y sustituirlo por un sistema de contención hermética portátil y reemplazable. A diferencia de dichas tecnologías, cuyo funcionamiento depende de las propiedades del suelo receptor, ya sea para infiltración, estabilización o almacenamiento, el CBS es una tecnología de saneamiento de cadena completa, donde la fase de contención está físicamente separada del suelo, el tratamiento se realiza en instalaciones centralizadas externas al emplazamiento, y el servicio se basa en la recolección, transporte y sustitución periódica de los contenedores por un proveedor de servicios, componente organizativo y de gestión sin equivalente funcional en las tecnologías de foso anteriores. El Programa Conjunto de Monitoreo (JMP) de UNICEF y la OMS reconoció formalmente en 2018 al CBS como tipo de saneamiento mejorado, y en 2019 como saneamiento gestionado de manera segura a nivel de hogar en el contexto del indicador del ODS 6.2, reconocimiento documentado por la Container-Based Sanitation Alliance (CBSA) y *Frontiers in Environmental Science* (Strande et al., 2014), siendo la única tecnología de saneamiento in situ sin infraestructura enterrada que alcanza esta clasificación.

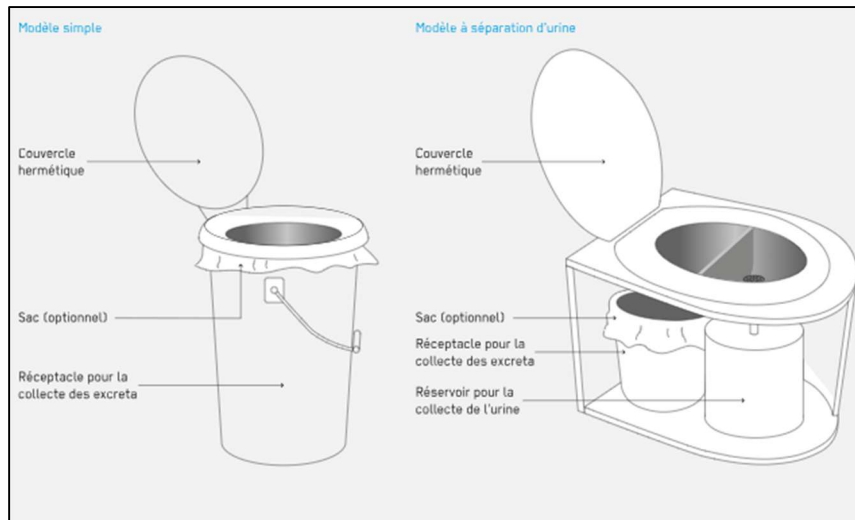


Figura 18 Esquema ilustrativo de sistema CBS

Fuente: Emersan compendium

Condiciones de implantación

Al no requerir excavación ni interacción funcional con el suelo, las condiciones de implantación del CBS son totalmente distintas de las descritas en los apartados anteriores para las tecnologías de foso. Los condicionantes hidrogeológicos, edafológicos y topográficos que determinan la viabilidad técnica de todas las letrinas de foso, tales como la profundidad del nivel freático, el tipo de suelo, la permeabilidad, el riesgo de inundación y pendiente del terreno, no condicionan la viabilidad del sistema CBS. La CBSA enumera explícitamente como contextos apropiados para el CBS precisamente aquellos donde estas condiciones son más restrictivas para las tecnologías de foso: asentamientos informales densamente poblados, asentamientos de refugiados o transicionales, áreas con suelos rocosos, condiciones de suelo inestable, niveles freáticos altos, terrenos en colinas, disponibilidad limitada de agua y riesgo de inundaciones frecuentes. El EMERSAN Compendium se reafirma en esa línea, clasificando el CBS como adecuado para condiciones de terreno difíciles, atributo que ninguna de las tecnologías de foso anteriores posee con la misma amplitud.

Las condiciones de implantación específicas que sí resultan determinantes para el CBS son de naturaleza logística, institucional y urbana, no geotécnica. El EMERSAN Compendium establece el requisito fundamental: la tecnología solo es viable si una

empresa u otra organización garantiza la recolección, el vaciado y el transporte regular de los contenedores; sin este servicio de gestión, no es una opción viable. Esta dependencia de un servicio externo determina que la viabilidad del CBS esté condicionada por la existencia de infraestructura de transporte accesible, no siendo necesarios vehículos pesados, sino para transporte manual o motorizado ligero a escala de pueblo o barrio, la disponibilidad de instalaciones de tratamiento o transferencia a distancia razonable del área de servicio, y la existencia de un modelo de gestión del servicio sostenible financieramente.

Respecto al marco normativo, las condiciones de aplicación del CBS están menos establecidas en regulaciones nacionales específicas que las tecnologías de foso, dada su relativa novedad como tecnología sistematizada. El Informe del Banco Mundial de 2019 sobre evaluación del potencial del CBS señalaba que a pesar de llevar varios años en operación, la mayoría de los servicios CBS seguían en fases de desarrollo relativamente tempranas, lo que refleja parcialmente la ausencia de marcos regulatorios consolidados que reconozcan y faciliten su operación. La formalización regulatoria avanza progresivamente, además del reconocimiento JMP de 2018-2019, ciudades como Ciudad del Cabo y Manila han integrado el CBS como parte de sus estrategias de saneamiento inclusivo a escala de ciudad.

Tipología de sistemas y formatos de contenedor

El EMERSAN Compendium describe una gama de formatos de CBS que va desde la solución más básica hasta diseños de ingeniería avanzada, ordenados creciente complejidad técnica. El primer nivel, explícitamente señalado como no recomendable por el EMERSAN Compendium, corresponde a los baldes simples con tapas: aunque proporcionan contención básica, la ausencia de hermeticidad garantizada, la dificultad de sellado durante el transporte y el riesgo de derrames hacen de esta opción la más deficiente de la categoría. El segundo nivel son los baldes revestidos con una bolsa impregnada de urea, de los cuales el ejemplo más documentado es el producto Peepoo, que es el nombre comercial del producto desarrollado por la empresa sueca Peepople, cuyo mecanismo de autosanitización fue caracterizado científicamente por Vinnerås et

al. (2009), publicado en *Water Science and Technology*, Vol. 60(2): una bolsa biodegradable de 15 × 40 cm con un revestimiento interno de 4 gramos de urea que, al hidrolizarse en contacto con la orina y las heces, genera amoníaco que inactiva progresivamente los patógenos presentes. El tercer nivel corresponde a los diseños más sofisticados en los que se separa la orina de las heces, reduciendo el volumen del contenedor de heces, eliminando la fracción líquida, mayoritaria en volumen, y generando dos flujos diferenciados.

Capacidad de los contenedores y criterio de diseño

El EMERSAN Compendium establece que la capacidad del contenedor de recolección no debe superar los 50 a 60 litros para que pueda extraerse y transportarse de forma manual con facilidad. Este límite de 50-60 litros responde a criterios ergonómicos de manejo seguro sin equipamiento especializado. El tamaño del contenedor debe seleccionarse según la cantidad prevista de usuarios y la capacidad y frecuencia de recolección del servicio, según el EMERSAN Compendium, de modo que el contenedor no se llene antes de la siguiente visita de recolección programada pero tampoco permanezca incompleto durante períodos excesivamente largos que podrían generar condiciones de fermentación con producción de olores o degradación de la estanqueidad. Los contenedores deben ser completamente herméticos y contar con agarraderas que garanticen que su manipulación, almacenamiento intermedio si se necesita, almacenamiento y transporte puedan realizarse con seguridad.

Variante de separación de orina

El EMERSAN Compendium señala que si se busca una solución a más largo plazo, debe analizarse la posibilidad de utilizar el retrete CBS con separador de orina para reducir los costos de tratamiento. Esta recomendación responde a razones técnicas y económicas bien fundamentadas: la separación de orina en el punto de generación reduce drásticamente el volumen del contenedor de heces, al eliminar la fracción líquida mayoritaria (aproximadamente el 90% del volumen de los excrementos combinados en

términos volumétricos, según datos de caracterización de excretas del Instituto Suizo Federal de Ciencia Acuática y Tecnología en *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, 2014), reduce la humedad del contenido del contenedor de heces favoreciendo condiciones de desecación que potencian la inactivación de patógenos durante el almacenamiento y transporte, facilita el proceso de tratamiento de heces, al trabajar con un material de menor contenido hídrico, y genera dos flujos diferenciados con potenciales de valorización agronómica distintos, la orina como fuente concentrada de nitrógeno y fósforo, y las heces como fuente de materia orgánica.

Materiales de construcción y componentes del sistema

Los materiales del CBS difieren cualitativamente de los de las tecnologías de foso al no existir componentes enterrados. La estructura del sistema se compone de tres elementos: el contenedor de recolección, la caja o base que lo aloja (cuando se requiere), y el cubículo o superestructura que proporciona privacidad. El EMERSAN Compendium señala que los retretes basados en contenedores pueden ser tanto prefabricados como una mezcla de contenedores prefabricados y una caja elaborada localmente. Para las cajas y cubículos, los materiales descritos son madera, esterillas tejidas, ferrocemento o láminas metálicas (aunque estas últimas calientan el interior en climas cálidos, contraindicándose en la zona de estudio). El asiento del retrete o placa para acucillarse puede obtenerse o fabricarse localmente, o emplearse opciones prefabricadas. Para los usuarios que prefieran la posición de cuclillas, punto a considerar por el término de apropiación comunitaria que se ha mencionado en previas ocasiones en este documento, el EMERSAN Compendium indica que puede construirse una caja de madera para crear una plataforma sobre el contenedor.

El componente más específico del CBS en materia de materiales es la bolsa de revestimiento del contenedor cuando el sistema la requiere. El EMERSAN Compendium señala que algunos modelos de retretes CBS requieren de un revestimiento en forma de bolsa y que debe garantizarse la presencia de un proveedor de dichas bolsas, añadiendo que debe darse preferencia al uso de bolsas biodegradables ya que facilitan el proceso de tratamiento posterior como el compostaje. El caso de bolsa biodegradable con

función añadida de autosanitización, mencionado en apartados anteriores, es la bolsa Peepoo: el revestimiento de 4 gramos de urea genera, al hidrolizarse en contacto con la orina, amoníaco (NH_3) libre en concentraciones suficientes para inactivar patógenos. El modelado de inactivación de patógenos documentado por Engineering for Change (2024, con referencia al estudio de la Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas) indica que la sanitización apropiada del material fecal recogido en la bolsa se logra dentro de 2 a 4 semanas, tras lo cual la bolsa puede degradarse y reutilizarse como fertilizante. El requerimiento de suministro continuo de bolsas constituye una vulnerabilidad logística del sistema que el EMERSAN Compendium reconoce explícitamente, señalando que la interrupción del suministro del proveedor de bolsas compromete la operación del sistema, aspecto análogo a la dependencia del suministro de material orgánico de cobertura en la Fosa Alterna descrita en el apartado del sistema de pozos gemelos.

Aplicabilidad

El EMERSAN Compendium clasifica el CBS como una solución potencialmente adecuada por un punto principalmente: la ausencia de cualquier requisito de construcción, excavación o infraestructura fija. Asimismo, el CBS no requiere una estructura permanente y puede moverse en caso de ser necesario. La CBSA confirma que durante inundaciones los contenedores pueden sellarse para garantizar que no se libere ningún residuo, diferenciando al CBS de todas las tecnologías de foso que, como se señala en los apartados correspondientes, son susceptibles de fallar o desbordarse durante eventos de inundación.

La valoración comparativa entre fases de respuesta revela una asimetría notable. Esta asimetría refleja que las ventajas diferenciales del CBS, entre las cuales tenemos : velocidad de implantación, portabilidad, independencia del suelo, son más relevantes en la fase aguda, mientras que sus desventajas: costo operativo del servicio de recolección, dependencia del proveedor o potencial de abandono si el servicio se interrumpe, se acentúan en contextos de mayor permanencia donde las tecnologías de foso ofrecen mayor autonomía operativa a largo plazo. El EMERSAN Compendium señala la posibilidad de transición tecnológica como ventaja adicional: cuando se instala un

sistema de saneamiento basado en bolsas como las Peepoo, puede lograrse con facilidad una transición a un diseño más avanzado de CBS en una fase posterior, estrategia de escalamiento gradual que permite adaptar el nivel de inversión a la evolución de la emergencia hacia una situación de mayor estabilidad.

El Banco Mundial, citado en CBSA, concluyó que el CBS debe considerarse parte de las opciones de saneamiento inclusivo, enfatizando la asequibilidad, la seguridad y la resiliencia a las variaciones climáticas. El estudio de Tilmans *Container-based sanitation: assessing costs and effectiveness of excreta management in Cap Haitien, Haiti*, publicado en el International Institute for Environment and Development (2015) cuantificó el impacto del servicio CBS piloto en Cap Haitien: el servicio generó una reducción aproximada de 3,5 veces en la fracción de heces no gestionadas y eliminó casi por completo el uso declarado de defecación al aire libre y letrinas de bolsa voladora (flying toilets) entre los beneficiarios del servicio.

Aspectos ambientales y de sostenibilidad

Los aspectos ambientales del CBS difieren fundamentalmente de los descritos para las tecnologías de foso en que la ausencia de componentes enterrados elimina por completo el riesgo de contaminación directa de acuíferos desde el punto de contención, trasladando el foco de riesgo ambiental hacia la cadena de transporte y tratamiento centralizado. Este desplazamiento del riesgo ambiental desde el emplazamiento del hogar hasta las instalaciones de tratamiento es una característica estructural del CBS que, correctamente gestionada, permite concentrar las medidas de control ambiental en puntos específicos de la cadena más fácilmente supervisables que la dispersión de cientos o miles de fosos individuales en un área de servicio.

La dimensión ambiental más positiva y diferencial del CBS respecto a las tecnologías de foso es su impacto sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. La CBSA documenta, con referencia a su trabajo con la consultora de finanzas de carbono South Pole, que los proyectos CBS eliminarían entre el 79% y el 93% de las emisiones de línea base dependiendo del tratamiento aplicado. Este rango de reducción, muy superior al

de cualquier tecnología de foso, se explica por el mecanismo de funcionamiento: al sellar y transportar rápidamente las excretas hacia instalaciones de tratamiento aerobio, el CBS interrumpe la degradación anaerobia que produce metano y que es el principal mecanismo de generación de GEI en fosos de letrina y fosas sépticas. La CBSA señala también que los sistemas CBS reducen significativamente las emisiones de GEI al separar y tratar rápidamente los residuos, reduciendo la degradación anaerobia que produce metano, el segundo mayor impulsor del calentamiento global entre los GEI. El UN-Habitat, citado por la CBSA, ha calificado al CBS como tecnología de vanguardia para aprovechar el potencial de reutilización de los lodos fecales en la economía circular.

Seguridad y salud

Los riesgos de seguridad física durante la construcción e implantación del CBS son mínimos en comparación con las tecnologías de foso. Al no requerir excavación, se eliminan por completo los riesgos de colapso de paredes durante la excavación manual documentados en el apartado de la letrina de foso simple, y el riesgo de caída accidental de usuarios al interior del contenedor. El EMERSAN Compendium señala como punto fuerte del CBS explícitamente que reduce el riesgo de sufrir episodios de violencia de género, aspecto de seguridad personal particularmente relevante para mujeres y niñas que en contextos de emergencia o asentamientos informales se enfrentan a riesgos de agresión durante los desplazamientos nocturnos para acceder a instalaciones sanitarias compartidas alejadas de la vivienda. Además, indica que el CBS puede utilizarse dentro del hogar, lo que garantiza el acceso fácil de día y de noche y permite mejorar la gestión de las heces de los niños pequeños (grupo de edad de mayor vulnerabilidad al riesgo de caída en los sistemas de foso abierto, como se señaló en el apartado de la letrina de foso simple).

El principal riesgo de salud y seguridad específico del CBS afecta a los trabajadores del servicio de recolección y transporte, que mantienen contacto frecuente con contenedores y superficies exteriores potencialmente contaminadas. El EMERSAN Compendium establece que los proveedores de mantenimiento que recolectan y vacían los contenedores se exponen especialmente al riesgo de contraer enfermedades asociadas al excremento, y que una gestión rigurosa de los procedimientos de vaciado y

el uso de buen equipo de protección personal e instalaciones de baño son fundamentales para la protección de los trabajadores. La limpieza cuidadosa de los contenedores en un espacio designado a cargo de personal capacitado, y la gestión segura, deben incorporarse sistemáticamente en los procedimientos de operación del servicio.

En cuanto al reconocimiento de saneamiento seguro, la CBSA señala que los servicios CBS (de cadena completa) son reconocidos por el JMP como saneamiento gestionado de manera segura y que los retretes CBS nunca se llenan ni dejan lodos fecales sin tratar que contaminen el medio ambiente, incluso durante inundaciones cuando pueden sellarse para asegurar que no se libere ningún residuo, ventaja de seguridad sanitaria frente a todas las tecnologías de foso que se estudian en este documento.

Costos

El EMERSAN Compendium clasifica los retretes basados en contenedores como soluciones moderadamente costosas, con un costo inicial de medio a alto, aunque señala que pueden implementarse con rapidez y, una vez gestionados bien, pueden utilizarse de manera sostenida a largo plazo. La estructura de costos del CBS difiere radicalmente de la de las tecnologías de foso al carecer de costos de excavación, revestimiento y losa de cobertura, pero incorporando costos de servicio recurrentes que no se tienen en cuenta en las tecnologías de foso estudiadas previamente. Establece también que todo cálculo de costos debe reflejar los requisitos adicionales de operación y mantenimiento como las tareas frecuentes de recolección, transporte, limpieza, almacenamiento, tratamiento y disposición final o reutilización del lodo.

En el estudio realizado por EY y Water & Sanitation for the Urban Poor (WSUP) publicado en 2021, en el cual se basan en datos de campo de Haití, Ghana, Kenia, Perú y Madagascar, concluyen que la mayoría de los modelos CBS operando a mayor escala son también menos costosos que las letrinas de pozo y los tanques sépticos, en hasta un 38% y un 74% por hogar y año respectivamente; y que un análisis de sistemas CBS típicos en

cinco países encontró que son aproximadamente un 13% más rentables que las letrinas de pozo.

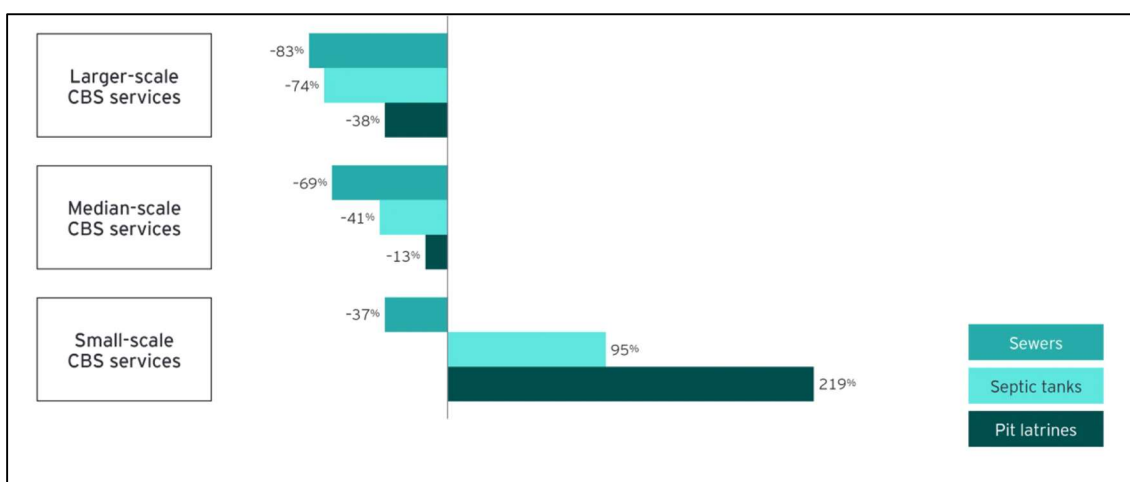


Figura 19 Diferencia porcentual del coste anual por hogar de servicio CBS comparado con otras formas de saneamiento.

Fuente: EY, 2021

El estudio de Tilmans en 2015, mencionado previamente, sobre el piloto CBS en Haití, señala que los costos del servicio a pequeña escala fueron superiores a los del alcantarillado a gran escala, pero documenta que las economías de escala tienen el potencial de reducir los costos del CBS a lo largo del tiempo, perspectiva que la CBSA confirma indicando que el CBS es accesible a veces como suscripción asequible, permitiendo a los residentes acceder a saneamiento gestionado de manera segura más rápidamente con una inversión inicial menor comparada a la construcción de una letrina o un retrete de arrastre.

Consideraciones sociales y culturales

Las consideraciones generales de participación comunitaria en procesos de planificación, sensibilidad de género y equidad en el acceso son de aplicación para el CBS en los mismos términos descritos en el apartado de la letrina de foso simple. El EMERSAN Compendium analiza que la posible implementación de los retretes basados en contenedores debe analizarse por anticipado con las comunidades destinatarias, ya que

el sistema puede presentar implicaciones asociadas a cambios de conductas, y para coincidir con las preferencias de los usuarios en cuanto a la interfaz de usuario que ya se han mencionado en otras ocasiones, tales como preferencia por posición sentado o cuclillas, prácticas de limpieza anal, color del producto y estética del equipamiento. Se prevé la necesidad de capacitar y orientar a los usuarios para respaldar la aceptación, garantizar el uso correcto y el mantenimiento de las instalaciones, especialmente importante en modelos con separador de orina, dado que la distinción funcional entre el orificio de heces y el colector de orina es una implementación que los generalmente los usuarios a los que se destina este servicio no estarán acostumbrados.

Una consideración social diferencial del CBS respecto a las tecnologías de foso es que opera como un modelo de servicio con suscripción, lo que introduce dinámicas de demanda, disposición a pagar y fidelización de clientes que no existen en las tecnologías de construcción propia. Uno de los principales problemas que se pueden anticipar en este modelo es la continuidad del pago de la cuota de suscripción era el factor de sostenibilidad más crítico, siendo la retención de clientes es uno de los desafíos principales para la escalabilidad del CBS, dado que la interrupción del pago por parte de los usuarios compromete la viabilidad a nivel económico del operador del servicio y, en consecuencia, la continuidad del servicio para todos los suscriptores de la ruta.

En cuanto a los beneficios específicos de equidad de género, el EMERSAN Compendium señala explícitamente que el CBS reduce el riesgo de sufrir episodios de violencia de género, aspecto que la CBSA amplía documentando que el sistema CBS proporciona un espacio privado y seguro para que las mujeres y niñas utilicen el retrete y gestionen la menstruación y el embarazo. Adicionalmente, señala que como retrete en el hogar puede mejorar la accesibilidad para personas con discapacidades físicas, adultos mayores y niños pequeños. Estos beneficios diferenciales de equidad, en particular para mujeres, niñas, personas con movilidad reducida y niños pequeños, son superiores a los descritos para las letrinas de foso, donde la necesidad de desplazamiento hasta la instalación exterior y el diseño de orificio de defecación abierto generan barreras específicas para estos grupos, como se describió en el apartado de consideraciones sociales de la letrina de foso simple.

Operación y mantenimiento

Las prácticas de operación y mantenimiento del CBS tienen una estructura dual que diferencia entre las responsabilidades del usuario y las del proveedor de servicios, dualidad que no existe en las tecnologías de foso de gestión autónoma. El EMERSAN Compendium establece que la división de tareas y responsabilidades de O&M entre usuarios y posibles proveedores de mantenimiento debe definirse con claridad e incluirse en el proceso de planificación como requisito previo a la implementación. Las tareas clave de O&M identificadas incluyen el vaciado regular, la limpieza y reemplazo de los contenedores de recolección, las cuales se valorarán según el tamaño del contenedor y la cantidad de usuarios, y que pueden realizar tanto los usuarios como un responsable de mantenimiento, el traslado de los contenedores mediante transporte manual o motorizado a centros de tratamiento, y la limpieza cuidadosa de los contenedores en un espacio designado a cargo de personal capacitado, con gestión segura del agua de limpieza resultante.

La frecuencia de recolección es el parámetro de diseño operativo más crítico del sistema: debe calibrarse de modo que el contenedor no alcance su capacidad máxima entre visitas, lo que generaría desbordes o abandono del sistema por parte del usuario, ni sea recogido con contenido tan escaso que resulte económicamente ineficiente para el proveedor. El EMERSAN Compendium (s.f.) señala que cada retrete CBS debe suministrarse con el material de limpieza anal correspondiente, aspecto de aprovisionamiento continuo que debe incluirse en la planificación del servicio. En el sistema de bolsa Peepoo, al cual nos hemos referido en numerosas ocasiones ya en este estudio, la logística de suministro de bolsas constituye un componente operativo crítico. Engineering for Change documenta que el sistema Peepoo en Kibera opera a través de puntos de recogida locales donde los operadores del servicio recogen los Peepoos usados a cambio de una tarifa de devolución, siendo las mujeres microempresarias las principales distribuidoras del producto nuevo, modelo de cadena de valor que integra la gestión del saneamiento con oportunidades de generación de ingresos para la comunidad.

Escalabilidad y replicabilidad

La escalabilidad del CBS presenta un perfil de ventajas y restricciones totalmente diferente al de las tecnologías de foso descritas en los apartados anteriores. La ventaja de escalabilidad más significativa del CBS es la posibilidad de expansión territorial rápida sin dependencia de condiciones del suelo o infraestructura enterrada. Dado que el servicio se basa en la distribución de equipamiento portátil y en rutas de recolección, puede extenderse a nuevas áreas de servicio con la misma velocidad que permite la logística de distribución de los contenedores, sin necesidad de caracterización geotécnica previa ni de construcción de infraestructura fija. El EMERSAN Compendium señala que la solución puede implementarse con relativa rapidez y distribuirse de forma manual si hay existencias disponibles, aspecto que en situaciones de emergencia permite alcanzar cobertura masiva en plazos de días frente a las semanas o meses que requiere la construcción de letrinas de foso.

La restricción de escalabilidad más importante es la necesidad de un modelo de negocio sostenible para el operador del servicio. Los servicios CBS no recuperan actualmente sus costos de manera autónoma y algún nivel de financiamiento filantrópico o público sigue siendo necesario, lo que limita la sostenibilidad a largo plazo sin apoyo externo. El mismo estudio identifica los principales desafíos de escalamiento: necesidad de mandatos gubernamentales que reconozcan y regulen el CBS como opción de saneamiento legítima, marcos regulatorios que faciliten la operación de proveedores CBS, y financiamiento innovador. A pesar de llevar varios años en operación, la mayoría de los servicios CBS siguen en fases de desarrollo relativamente tempranas, reflejando las dificultades para alcanzar escala suficiente que permita la autosostenibilidad financiera. Los modelos de negocio más prometedores identificados por la CBSA combinan cuotas de usuario asequibles con ingresos por venta de subproductos del tratamiento, entre ellos compost, biocarbón, biogás, proteína animal; y con contratos de servicio con municipios o programas de cooperación, ampliando la capacidad de ingresos que reduce la dependencia exclusiva de la capacidad de pago de usuarios de bajos ingresos.

4.3. Evaluación multicriterio

Evaluación multicriterio de tecnologías de saneamiento

Contexto de aplicación: Región de Kedougou, Senegal

Tecnologías evaluadas: Letrina de foso simple · VIP simple · Sistema de pozos gemelos · Retrete basado en contenedores (CBS)

Criterio de evaluación	Letrina de Foso Simple	VIP Simple	Pozos Gemelos (VIP doble / Fossa Alternativa)	Retrete Basado en Contenedores (CBS)	Adecuación a Kedougou
1. Condicionantes físicos del emplazamiento					
Dependencia del suelo / geotecnia	Alta — excavación manual; colapso frecuente en suelos arenosos	Alta — ídem letrina de foso	Alta para VIP doble (3 m); baja para Fosa Alternativa (< 1,5 m)	Nula — sin componente enterrado	Alta en la región, pero sólo relevante para tecnologías de foso
Nivel freático mínimo requerido	≥ 3 m por encima del nivel freático estacional (Mara, 1984)	Ídem letrina de foso simple	VIP doble: ≥ 3 m. Fossa Alternativa: mayor tolerancia (foso elevable)	Sin restricción — no hay componente enterrado	Nivel freático variable y elevado en épocas de lluvia en Kedougou → riesgo para tecnologías de foso
Riesgo de inundación / terreno difícil	Inadecuado — riesgo de desbordamiento; foso se inunda	Ídem letrina de foso simple	FA puede construirse elevada; VIP doble vulnerable	Adecuado — contenedores sellables durante inundaciones	Kedougou: régimen pluviométrico ~1.000–1.400 mm/año con estacionalidad marcada → inundaciones periódicas en zonas bajas
Espacio en superficie requerido	Bajo — 1 solo foso	Bajo — 1 foso + tubo ventilación	Doble que foso simple — puede ser limitante en concesiones pequeñas	Bajo — cabe en el interior del hogar	Concesiones rurales: espacio disponible. Núcleos densos: limitado
Adecuación topográfica	Pendiente < 15% óptima; ≥ 15% requiere aterrazamiento	Ídem letrina de foso simple	Ídem. Doble excavación complica pendientes pronunciadas	Sin restricción topográfica	Topografía accidentada en zonas de borde de la región
2. Requerimientos de agua y clima					
Necesidad de agua para funcionamiento	Ninguna — tecnología seca	Ninguna — tecnología seca	Ninguna — tecnología seca (FA: únicamente material orgánico)	Mínima — limpieza del contenedor únicamente	Favorable: escasez relativa de agua en época seca en Kedougou
Compatibilidad con estacionalidad extrema	época lluviosa: riesgo de anegamiento del foso	Ídem letrina de foso simple	FA más resiliente por menor profundidad	Alta — contenedor sellable e independiente del suelo	Estación lluviosa intensa en Kedougou → factor crítico contra tecnologías de foso
3. Rendimiento sanitario y ambiental					
Reducción de patógenos en el punto de contención	Muy baja — excretas frescas sin tratamiento significativo	Muy baja — igual que foso simple; ventilación no trata patógenos	Moderada tras ≥ 1 año de reposo; incompleta para helmintos	Moderada en tránsito; tratamiento centralizado determina reducción final	Kedougou: alta carga de enfermedades diarreicas → exige máxima reducción
Control de olores y moscas	Bajo — orificio abierto al foso; moscas libres	Alto — ventilación + malla + oscuridad	Alto en VIP doble; FA: adición de material de cobertura reduce olores	Alto — contenedor hermético sellado entre usos	Contexto rural: moscas son vector crítico de enfermedades entéricas
Riesgo de contaminación de acuíferos	Alto — infiltración directa sin tratamiento	Alto — ídem; ventilación no reduce el riesgo de infiltración	Moderado-alto — infiltración persiste en foso activo	Nulo desde el punto de contención — riesgo trasladado a instalación de tratamiento centralizada	Kedougou: fuentes de agua subterránea usadas para consumo → riesgo relevante
Potencial de valorización de recursos	Nulo en la práctica — lodo de difícil manejo	Nulo en la práctica	Alto — eco-humus como fertilizante; recurso valorado en agricultura de subsistencia	Alto — compost, biocarbón, biogás, proteína animal	Kedougou: economía agrícola de subsistencia → valorización de nutrientes es una oportunidad real
4. Aspectos constructivos y costos					
Complejidad constructiva	Baja - Moderada — excavación + revestimiento + losa. Mala ejecución puede limitar el tiempo de vida o inutilizar la letrina	Baja-moderada — añade tubo ventilación + malla + oscuridad	Moderada — doble excavación + ciclo de alternación + sellado	Muy baja — sin excavación. Distribución directa de equipamiento	Disponibilidad local de albañiles para letrinas de foso; CBS no requiere construcción
Costo de capital (inversión inicial del usuario)	Moderado — Costo inaccesible para gran parte de habitantes de la región	Moderado — incremento del 5-15% sobre foso simple (estimación orientativa)	Medio — El doble que foso simple aproximadamente	Variable (muy bajo/moderado) — dependiendo del modelo implantado	Capacidad de inversión familiar baja en Kedougou → tecnologías de muy bajo coste preferibles o CBS con subsidio
Costo de O&M (operativo anual)	Muy bajo-nulo	Muy bajo — limpieza de malla periódica adicional	Bajo-moderado — vaciado manual de material compostado	Alto — recolección frecuente + transporte + tratamiento	Infraestructura de vaciado y transporte muy limitada en Kedougou → costo crítico para CBS
Vida útil del sistema	3-10 años por foso (gran variabilidad según construcción y usuarios)	3-10 años por foso. Equivalente al foso simple	Larga con ciclo de alternación correcto — foso se reutiliza tras vaciado	Indefinida si el servicio de recolección es continuo — el contenedor se sustituye	Permanencia de los asentamientos rurales en Kedougou: generalmente larga → tecnologías de larga vida preferibles
5. Aspectos sociales e institucionales					
Requerimiento de proveedor externo de servicios	Sólo en fase de ejecución	Sólo en fase de ejecución	Sólo en fase de ejecución (Personas mayores dependen de terceros)	Imprescindible — sin proveedor de recolección el sistema no es viable	Ausencia de operadores CBS en Kedougou → barrera institucional
Tasa de uso sostenido documentada	Uso normalizado en Kedougou	Uso normalizado en Kedougou	Dependiente de valoración del eco-humus. Difícil de implementar en Kedougou por falta de compromiso	Alta cuando el servicio es continuo	Contexto rural Kedougou: cambio conductual requiere CLTS o equivalente
Sensibilidad de género y equidad	Moderada — distancia, oscuridad y uso nocturno generan barreras para mujeres y niñas	Moderada — equivalente al foso simple	Moderada — equivalente al foso; FA añade manejo de humus que puede ser culturalmente sensible	Alta — uso domiciliario, uso nocturno seguro, gestión menstruación, mejora gestión heces infantiles	Elevada vulnerabilidad de mujeres y niñas en asentamientos de Kedougou → ventaja diferencial del CBS
Adecuación cultural / aceptabilidad	Alta para defecación seca; adaptación a costumbres locales documentada	Alta — equivalente al foso simple	Moderada para VIP doble; FA requiere aceptación del manejo de eco-humus como fertilizante	Moderada — requiere cambio de conducta significativo y confianza en el proveedor	Requiere investigación participativa previa en la región — no hay datos publicados verificados
Marco normativo senegales aplicable	Regulado por Code de l'Hygiène; reconocida como tecnología mejorada	Reconocida; idéntico marco que foso simple	Reconocida; idéntico marco que foso simple	Sin reconocimiento normativo explícito en Senegal a la fecha — posible barrera regulatoria	Contexto rural Kedougou: cambio conductual

Leyenda de colores:

■ Verde: favorable / ventaja diferencial ■ Amarillo: condicionado / moderado ■ Rojo-naranja: desfavorable / riesgo elevado ■ Gris: neutro / no aplicable

5. Resultados

5.1. Selección del tipo de saneamiento para el caso de estudio: Sistema CBS

El análisis comparativo de las distintas tecnologías de saneamiento aplicables a contextos rurales que se ha presentado en el apartado anterior permite identificar las limitaciones que presentan muchas de las soluciones convencionales cuando se aplican en entornos con recursos económicos limitados, condiciones hidrogeológicas complejas o baja capacidad institucional para la gestión del servicio. La mayoría de los habitantes de Kedougou, tal y como se ha mencionado en previos apartados, ya sea por falta de recursos económicos suficientes para pagar mano de obra o desconocimiento del proceso constructivo (generalmente ambas), no puede acceder a un mínimo básico como es un servicio de saneamiento.

YAKAAR AFRICA

LE BILAN DES FOSSES A IBEL

QUANTITE	DESIGNATION	P.UNIT	P.TOTAL
06 Tonnes +02 sacs *4 pour les brigues *le reste pour la construction	Ciments	4350f	531 000f
07 chargements *04 les brigues *03 pour la construction	Sable	45 000f	315 000f
04 tonnes	Mouleurs pour 4 tonnes		137 000f
10	Chaises fûque petit model	9 000F	90 000F
08	Tubes longueur 125 (6 mètres)	12 000f	96 000f
06	Fil de fer	1 000F	6 000f
200kg+36 barres de 8	fer	2 500f	160 000F
100kg de 6	fer		30 000f
	Transport des bagages		73 000f
	Betton, séparer les brigues et le reste des matériels au niveau des fosses	17 500f	175 000f
45	Crétins		95 000f
06 tonnes et 300kg de fer	Décharge fer et ciments		6 000f
02	Maçons 10 fosses	75 000f	750 000f
Recours 9 barres de fer de 8 et Tube de 8m + mobil de 2m et 100 brigues			TOTAL=2 464 000f

Figura 20 Desglose de costes de construcción de letrinas. Ibel

Fuente: Yakaar África

En la *Figura 19* tenemos un desglose de los costes incurridos por la ejecución de 10 letrinas de foso simple en Ibel, Kedougou. El total de 2.464.000 francos CFA equivale aproximadamente a 3.750€, obteniendo un precio unitario por letrina de 375€ aproximadamente. En una zona donde la población subsiste prácticamente durante todo el año únicamente, en la mayoría de los casos, con el dinero obtenido durante la temporada de lluvias en jornadas de trabajo agrícola con una remuneración de 2-5€ diarios, vemos la magnitud de la inversión que han de realizar.

Basado en este contexto, se ha seleccionado el sistema de saneamiento basado en contenedores CBS como la alternativa más adecuada para el desarrollo del caso de estudio.

El modelo CBS representa un enfoque relativamente innovador dentro de los sistemas de saneamiento descentralizado a nivel global, y totalmente innovador en la región de Kedougou. A diferencia de las soluciones tradicionales basadas en letrinas de foso o sistemas de infiltración en el terreno, este modelo se basa en la separación, almacenamiento seguro y recogida periódica de las excretas humanas en contenedores sellados, que posteriormente son transportados a instalaciones de tratamiento adecuadas. De esta forma, el saneamiento se concibe no únicamente como una infraestructura estática, sino como un servicio organizado de recogida, transporte y tratamiento, similar a los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos y una respuesta a la imposibilidad a corto-medio plazo de ejecución de sistemas de saneamiento desarrollados como el alcantarillado.

Uno de los aspectos más relevantes del sistema CBS es su alineación con los principios de economía circular. Al evitar la infiltración directa de las excretas en el suelo, el sistema permite su recuperación y tratamiento controlado, facilitando procesos posteriores como el compostaje o la producción de enmiendas orgánicas para uso agrícola. De esta manera, los residuos humanos dejan de ser considerados un problema sanitario y ambiental para convertirse en un recurso potencial que puede reincorporarse al ciclo productivo, reduciendo la pérdida de nutrientes y contribuyendo a sistemas agrícolas más sostenibles.

Desde el punto de vista sanitario, el sistema CBS presenta ventajas significativas frente a soluciones tradicionales. En muchos contextos rurales, se ha descrito como las letrinas de foso pueden generar riesgos de contaminación de aguas subterráneas y superficiales debido a la infiltración de patógenos procedentes de las excretas, siendo un riesgo potencial para la población debido al consumo directo a través de pozos. El modelo CBS elimina este riesgo al confinar las excretas en contenedores herméticos, evitando el contacto directo con el suelo y

reduciendo de forma considerable la posibilidad de transmisión de enfermedades asociadas a la contaminación fecal del agua.

Otro factor determinante en la selección de esta tecnología es su accesibilidad económica para los hogares. Las soluciones convencionales de saneamiento suelen requerir inversiones iniciales relativamente elevadas para la construcción de infraestructuras permanentes, lo que representa una barrera significativa para las familias, cuyos recursos limitados. En contraste, el sistema CBS requiere una inversión inicial mucho menor, ya que la instalación sanitaria básica y el coste se distribuye a través de un modelo de servicio basado en el pago periódico por la recogida y gestión de los contenedores. Este enfoque facilita el acceso al saneamiento mejorado para un mayor número de hogares.

Además, el modelo CBS puede contribuir de manera relevante al desarrollo económico local mediante la creación de empleo. La prestación del servicio implica diversas actividades operativas, entre ellas la fabricación o instalación de unidades sanitarias, la recogida y transporte de contenedores, el mantenimiento del sistema y la gestión de las instalaciones de tratamiento. Estas actividades pueden generar oportunidades laborales a nivel comunitario, favoreciendo la aparición de pequeñas empresas o cooperativas locales dedicadas a la gestión del servicio.

Finalmente, la implantación de un sistema de saneamiento basado en contenedores puede representar un avance significativo en materia de higiene y salud pública. La disponibilidad de instalaciones sanitarias seguras y gestionadas adecuadamente contribuye a reducir prácticas como la defecación al aire libre y mejora las condiciones de salubridad en los hogares y en el entorno comunitario.

En conjunto, la combinación de seguridad sanitaria, accesibilidad económica de los usuarios, potencial de economía circular y generación de empleo local convierte al sistema CBS en una alternativa especialmente adecuada para contextos rurales como el considerado en este trabajo. Por estos motivos, se ha seleccionado esta tecnología como base para el desarrollo del servicio de saneamiento analizado en el presente caso de estudio.

5.2. Implementación del sistema CBS en la región de Kedougou

La implementación del sistema CBS que se va a desarrollar a continuación, se basa en la idea de que el saneamiento es un servicio público. No hay fórmulas mágicas, ni almas altruistas, con el poder económico suficiente para invertir en una plataforma que ponga una solución real, rápida y efectiva al saneamiento descentralizado, así como entendemos que la red de saneamiento por alcantarillado de cualquier ciudad del mundo ha sido desarrollada por la entidad pública competente. Lo que sí es posible es la colaboración público-privada, como así lo defiende la asociación CBSA en su Container-based sanitation (CBS): State of the sector 2025: full report, donde el director ejecutivo Rémi Kaupp explica que “La insistencia de algunas personas en que el saneamiento debe “pagarse por sí mismo” cuando es un servicio público esencial crea falsas expectativas que nos frenan”. En este informe, también deja claro que el sistema CBS no sólo existe y se aplica, si no que funciona y mejora la calidad de vida de las personas, así como las comunidades, no solo en contextos urbanos, sino también en zonas aisladas y de difícil acceso.

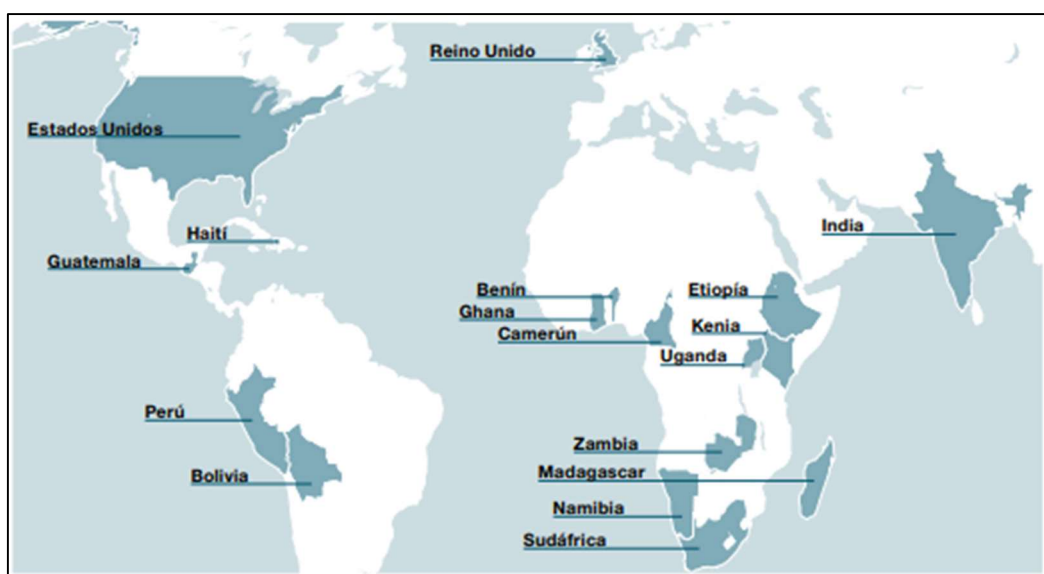


Figura 21 Presencia global de empresas CBS.

Fuente: CBSA

En este caso particular, en la región de Kedougou, puede haber un paso muy importante a nivel de aceptación cultural y de propuesta gracias al trabajo realizado por Yakaar África y otras asociaciones sin ánimo de lucro durante tiempo atrás.

Como en apartados anteriores ya se ha presentado el contexto socioeconómico, hidrológico y climático, así como otros factores, de la región de Kedougou, en los siguientes apartados se va a desarrollar la propuesta de implementación del sistema CBS basado en este contexto.

5.2.1. Cadena de servicio del sistema CBS

Desde que en 2019 el Banco Mundial recomienda que se considere el CBS como parte de las opciones de saneamiento inclusivo y el JMP reconoce los servicios de CBS domiciliarios como gestionados de forma segura, representando un avance hacia los ODS, el sistema saneamiento basado en contenedores ha crecido y se ha desarrollado, pasando de haber 72.000 usuarios atendidos por proveedores CBS, según estimaciones del Banco Mundial en ese año, a 432.000 usuarios en 2025, según estimaciones de la CBSA.

Este desarrollo ha dado lugar a el establecimiento de unas pautas de funcionamiento y recomendaciones en las que se basarán la cadena de servicio propuesta para la región de Kedougou.

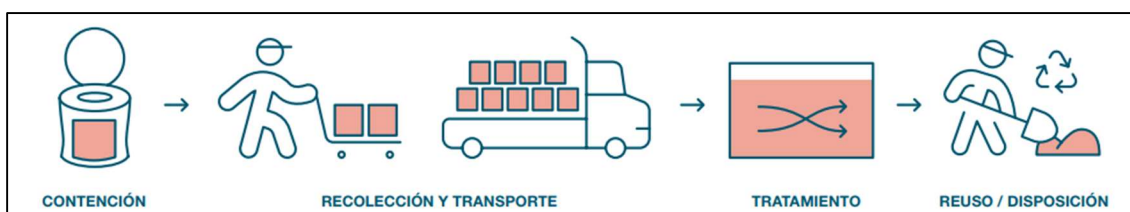


Figura 22 Cadena de servicio del sistema CBS

Fuente: CBSA

Contención

Para la implementación del sistema de saneamiento basado en contenedores en la región de Kedougou, se propone un modelo de sanitario doméstico sencillo, robusto y de bajo coste, adaptado a las condiciones socioeconómicas y climáticas de la región. El objetivo principal del diseño es garantizar un sistema seguro desde el punto de vista sanitario, fácil de operar por los usuarios y compatible con la prestación de un servicio de recogida periódica.

En base a la idea de mejorar el rendimiento en un tratamiento posterior de los residuos, el sistema propuesto se basa en el principio de saneamiento seco con separación de orina, lo que permite reducir la humedad del residuo sólido, mejorar las condiciones de almacenamiento en el contenedor y facilitar su posterior tratamiento. La separación de orina constituye además una estrategia eficaz para reducir la generación de olores y acelerar los procesos de estabilización de las excretas.

La unidad sanitaria se concibe como una instalación sencilla que puede integrarse en el entorno doméstico o en el exterior. Cualquier estructura separadora adicional puede construirse con

materiales disponibles localmente, como madera de bambú o bloques de tierra comprimida, con el fin de reducir los costes de implementación y facilitar su replicabilidad.

En el interior de la cabina se instala el sanitario seco con sistema de separación de orina, que dirige las fracciones líquidas y sólidas hacia compartimentos diferenciados.



Figura 23 Modelo de sistema CBS con separador de orina.

Fuente: Clean Team Toilets, Ghana

En la *Figura 22* se presenta un ejemplo de modelo CBS existente. Este modelo, perteneciente a la empresa Clean Team Toilets, ya funciona con un sistema de recogida de entre una y dos veces por semana, dando servicio a alrededor de 5.000 habitantes en Kumasi, Ghana, según datos aportados por Engineering for Change en 2024.

Sistema de separación de orina

El sanitario incorpora un dispositivo de separación en origen, mediante el cual la orina es conducida a través de una pequeña canalización hacia un recipiente independiente o hacia un sistema de infiltración controlada. La separación de la fracción líquida reduce significativamente el volumen y la humedad del material sólido almacenado en el contenedor, lo que facilita su manejo y mejora las condiciones sanitarias del sistema.

En base a la reducción de costes y simplificación del sistema, se prevé desechar la orina, infiltrándola directamente en el terreno a través de un pequeño pozo drenante o acumulándola en un depósito para su posterior vertido controlado.

Contenedor para excretas sólidas

La fracción sólida se deposita en un contenedor extraíble situado bajo el sanitario, diseñado para ser retirado periódicamente por el servicio de recogida. Este contenedor debe ser resistente, hermético y fácilmente manipulable por los operarios encargados del servicio.

Para mejorar las condiciones higiénicas del sistema, tras cada uso se añade una pequeña cantidad de material secante, como serrín, ceniza o restos vegetales secos. Este material cumple varias funciones, entre ellas la absorción de humedad, la reducción de olores y la limitación del desarrollo de insectos. En Kedougou, donde hay una alta producción de arroz durante la época de lluvias, las cáscaras de arroz son una alternativa excelente; mientras que la ceniza aporta un alto valor sanitario al tener un pH puede estar entre 9 y 12, lo que reduce la supervivencia de patógenos en el contenedor.

El dimensionamiento del contenedor se realiza considerando principalmente tres variables: la producción diaria de excretas por persona, el número de usuarios del sanitario y la frecuencia prevista de recogida del servicio. El objetivo es asegurar la capacidad suficiente para almacenar los residuos generados entre dos recogidas consecutivas, manteniendo a su vez un tamaño que permita su manipulación manual de forma segura durante la fase de recogida y transporte.

Diversos estudios técnicos sobre saneamiento descentralizado que se han citado en apartados anteriores de este estudio, entre ellos el *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, 2014, estiman que la producción media diaria de heces por persona se sitúa aproximadamente entre 150g y 240g, lo que equivale a un volumen aproximado de 0,20-0,30 L por persona y día. El contenedor destinado a la fracción sólida recibe únicamente las heces y el material secante utilizado tras cada uso. La adición de este material de cobertura incrementa el volumen total almacenado, representando aproximadamente entre un 20 % y un 30 % del volumen final.

Considerando estos factores, puede estimarse de forma simplificada que el volumen total generado por persona en el contenedor sólido es aproximadamente de 0,3 L por persona y día. Al ser un espacio de tiempo de acumulación en el contenedor corto, no contamos con el 20-30% de reducción de volumen por deshidratación inicial que en otros sistemas de mayor tiempo de acumulación se podría considerar. A partir de este valor es posible realizar un cálculo preliminar del volumen necesario del contenedor en función del número de usuarios y de los días entre recogidas.

El volumen requerido puede estimarse mediante la siguiente relación:

$$V = P \times v \times t$$

donde:

V es el volumen del contenedor requerido

P es el número de personas usuarias

v es el volumen generado por persona y día

t es el número de días entre recogidas

Si se considera un hogar tipo de cinco personas, con una frecuencia de recogida de cada tres días, y una producción media de 0,3 L por persona y día, el volumen mínimo teórico sería:

$$V = 5 \times 0,3 \times 3$$

$$V = 4,5 L$$

Este resultado representa únicamente el volumen mínimo necesario para almacenar los residuos generados en el periodo estimado. Sin embargo, se considera un margen de seguridad debido a varios factores de variabilidad, como el cambio en los patrones de uso, la presencia de materiales adicionales y la necesidad de evitar el llenado completo del contenedor antes de su sustitución.

Por este motivo, los sistemas CBS implementados en distintos países utilizan contenedores de mayor capacidad. Experiencias operativas desarrolladas por proveedores de servicios de saneamiento basado en contenedores, como Clean Team Ghana, SOIL en Haití o x-runner en Perú, emplean habitualmente contenedores con volúmenes de entre 20 y 25 litros.

Este rango de capacidad responde también a criterios ergonómicos, ya que un contenedor de este tamaño, una vez lleno, suele alcanzar un peso aproximado de 15 kg, lo que permite su manipulación manual durante las operaciones de recogida y transporte, sin necesidad de máquinas de soporte.

En el caso del sistema propuesto para la región de Kedougou, se considera adecuado adoptar un contenedor para la fracción sólida con una capacidad aproximada de entre 20 y 25 L, que permitiría atender a hogares de entre cuatro y seis usuarios con una frecuencia de recogida de

aproximadamente dos veces por semana. Este tamaño proporciona un equilibrio adecuado entre capacidad de almacenamiento, facilidad de manipulación y compatibilidad con los modelos de contenedores utilizados en otros sistemas CBS ya implementados.

El contenedor destinado al almacenamiento de la fracción sólida debe cumplir una serie de requisitos técnicos que garanticen la seguridad sanitaria del sistema y faciliten las operaciones de recogida y transporte. En primer lugar, el material debe ser completamente impermeable para evitar fugas de líquidos o lixiviados durante el almacenamiento y manipulación. Asimismo, debe presentar una resistencia mecánica suficiente para soportar golpes y manipulaciones repetidas durante las operaciones de sustitución, transporte y limpieza.

Por otra parte, el peso del contenedor vacío debe ser reducido para permitir su manipulación manual por parte de los operarios, considerando que el peso total una vez lleno puede alcanzar los 15 kg o más. Finalmente, el material debe permitir su limpieza y desinfección tras cada ciclo de uso, de forma que los contenedores puedan ser reutilizados de manera segura dentro del sistema de recogida.

En la mayoría de los sistemas de saneamiento basado en contenedores existentes, los recipientes utilizados están fabricados en polietileno de alta densidad (HDPE), un material plástico ampliamente utilizado en recipientes industriales debido a su elevada resistencia química, impermeabilidad, bajo peso y durabilidad.

Parámetro	Especificación técnica	Justificación
Tipo de sistema	Sanitario seco con separación de orina (UDDT-CBS)	Reduce el volumen de residuos sólidos y mejora el control de olores
Número de usuarios de diseño	4 – 6 personas por unidad	Tamaño medio de concesión en zonas rurales de la región de Kedougou
Contenedor de heces	20 – 25 L	Capacidad estándar utilizada en sistemas CBS existentes
Depósito de orina	Infiltración local o depósito 5L	La orina representa la mayor parte del volumen de excretas
Frecuencia de recogida	2 veces por semana	Evita el llenado del contenedor y reduce olores
Producción estimada de residuos	≈ 0,3 L/persona·día (incluyendo material secante)	Valor típico en sistemas CBS
Peso máximo del contenedor lleno	15 – 18 kg	Límite ergonómico para manipulación manual

Parámetro	Especificación técnica	Justificación
Material del contenedor	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Impermeable, ligero y resistente a la corrosión
Sistema de cierre	Tapa hermética desmontable	Evita fugas y exposición durante transporte
Material secante	Ceniza de madera o cáscara de arroz	Materiales disponibles localmente
Dosificación material secante	≈ 200–250 ml por uso (una taza aproximadamente)	Control de olores y absorción de humedad
Altura del sanitario	40 – 45 cm	Altura ergonómica estándar
Mantenimiento	Sustitución del contenedor durante la recogida	Permite un servicio continuo
Vida útil estimada del contenedor	5 – 10 años	Durabilidad típica del HDPE

Tabla 4 Especificaciones técnicas del modelo CBS propuesto

Fuente: Elaboración propia

Las especificaciones presentadas se basan en parámetros utilizados en distintos sistemas de saneamiento basado en contenedores implementados en contextos de bajos recursos. El objetivo del diseño propuesto es garantizar un sistema robusto, de bajo coste y fácil mantenimiento, adaptado a las condiciones socioeconómicas y logísticas de la región de Kedougou, así como facilitar el posterior tratamiento mediante la separación de fracción líquida y sólida.

Sistema de recogida del contenedor

La recogida y transporte de los contenedores constituye uno de los elementos centrales del funcionamiento del servicio, ya que garantiza la retirada segura de las excretas desde los hogares hasta la instalación de tratamiento. Para optimizar la eficiencia operativa del servicio, se ha considerado conveniente organizar el sistema logístico en torno a un centro único de operaciones, que integre tanto la planta de tratamiento como la base de operaciones de los vehículos de recogida.

Este enfoque permite centralizar todas las actividades relacionadas con el servicio en una misma instalación: recepción de contenedores llenos, tratamiento de residuos, limpieza y almacenamiento de contenedores vacíos, mantenimiento de vehículos y planificación de rutas. Con este planteamiento, los vehículos que realizan la recogida en las comunidades pueden transportar directamente los contenedores llenos hasta la planta, donde se descargan para su tratamiento, evitando la necesidad de realizar desplazamientos adicionales hacia un parque de

vehículos independiente. Esta organización reduce los tiempos de operación, simplifica la logística del servicio y disminuye los costes asociados al transporte.

La selección del emplazamiento de esta instalación debe considerar varios criterios técnicos y socioeconómicos. En primer lugar, es conveniente que la planta se sitúe en las proximidades del núcleo urbano de Kedougou, ya que la ciudad constituye el principal centro de población y de actividad de la región. Una localización relativamente cercana facilita las operaciones de recogida y reduce las distancias recorridas por los vehículos, lo que repercute positivamente en la eficiencia del sistema.

Se debe considerar también que la instalación debe situarse fuera del núcleo urbano, en una zona con suficiente distancia respecto a áreas residenciales. Este criterio responde tanto a la necesidad de minimizar posibles molestias derivadas de olores durante las operaciones de tratamiento como a la disponibilidad de terrenos a menor coste en áreas periurbanas o rurales. Ha de tenerse en cuenta que la parcela seleccionada debe disponer de buen acceso por carretera, permitiendo la circulación regular de vehículos de recogida y transporte.

Además de los criterios de localización de la planta, es necesario definir el ámbito territorial de servicio del sistema. En el caso de la región de Kedougou, aunque el modelo propuesto se plantea inicialmente para atender las zonas rurales, donde encontramos un mayor grado de vulnerabilidad e inaccesibilidad a este servicio, ampliar este servicio a la ciudad de Kedougou puede resultar beneficioso, ya que, tal y como se ha explicado en apartados anteriores, el sistema CBS mejora su rendimiento y retorno replicándolo a gran escala, pudiendo suavizar el coste superior que puede aplicarse al servicio en las zonas rurales. Por este motivo, resulta conveniente establecer un perímetro operativo que delimite la zona en la que el servicio de recogida puede prestarse de forma eficiente desde la planta central.

Este perímetro se define principalmente en función de la distancia máxima de desplazamiento de los vehículos de recogida, con el objetivo de mantener tiempos de transporte razonables y garantizar que las operaciones de sustitución de contenedores puedan realizarse dentro de una misma jornada de trabajo, así como reducir costes de combustible en los desplazamientos. En contextos rurales con infraestructuras viarias limitadas, suele considerarse adecuado un radio operativo que permita realizar rutas de recogida y retorno a la planta dentro de un tiempo total de operación asumible para el servicio.

La definición de este ámbito territorial permite estructurar posteriormente las rutas de recogida, agrupar las comunidades atendidas y planificar la frecuencia de servicio en cada localidad,

facilitando la estimación del número de vehículos necesarios, la longitud de las rutas y la capacidad de tratamiento requerida en la planta.

La organización del sistema en torno a una planta central que actúe simultáneamente como instalación de tratamiento y base logística del servicio constituye una estrategia adecuada para el contexto de la región de Kedougou. Este modelo permite optimizar las operaciones de recogida, reducir costes de transporte y establecer una estructura operativa clara para el desarrollo del servicio de saneamiento basado en contenedores en la región.

Tratamiento

Una vez transportados los contenedores llenos hasta la planta central de operaciones, comienza la fase de tratamiento, que constituye el eslabón crítico de la cadena del servicio y el que determina en última instancia la seguridad sanitaria del producto final. El tratamiento tiene por objeto la inactivación de los organismos patógenos presentes en las excretas humanas, entre los que figuran bacterias como la Salmonela, Escherichia coli y Campylobacter, así como protozoos y huevos de helmintos, y su transformación en un subproducto que pueda reintegrarse de forma segura en el ciclo de nutrientes. La OMS, en sus Directrices para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises en agricultura (2006), establece los umbrales de calidad microbiológica que debe alcanzar cualquier producto derivado del tratamiento de excretas humanas antes de su aplicación agrícola, siendo la eliminación de patógenos el criterio rector de cualquier sistema de tratamiento.

El sistema de tratamiento propuesto para la región de Kedougou se basa en el compostaje termofílico co-compostado, identificado como el método más empleado entre los operadores CBS a escala internacional, según la CBSA, y el que cuenta con mayor evidencia científica disponible sobre eficacia en la reducción de patógenos en heces fecales procedentes de sistemas de saneamiento descentralizados. Esta elección se justifica también por la disponibilidad local de los materiales estructurantes necesarios, algunos mencionados previamente como la cáscara de arroz y otros residuos agroindustriales, y por la viabilidad técnica del proceso en las condiciones climáticas de la región.

El compostaje termofílico es un proceso de biodegradación aeróbica controlada en el que comunidades microbianas sucesivas descomponen la materia orgánica a través de tres fases diferenciadas: una fase mesofílica inicial (20–40 °C), una fase termofílica activa (45–75 °C) y una

fase de maduración o curado. Es durante la fase termofílica cuando se alcanzan las temperaturas necesarias para la inactivación de los principales patógenos presentes en las excretas humanas. Según la Universidad de Cornell (Cornell Compost, 2024), las temperaturas superiores a 55 °C resultan letales para la mayoría de los microorganismos causantes de enfermedades humanas.

La Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (US EPA, 2003) establece que la inactivación de patógenos puede considerarse suficiente cuando la totalidad de las partículas del compost se mantienen a una temperatura mínima de 55 °C durante al menos tres días consecutivos, o bien a 40 °C durante cinco días, con al menos cuatro horas por encima de 55 °C. Estos mismos umbrales son adoptados como referencia por las Directrices de la OMS en 2006 para el tratamiento de excretas. En condiciones de compostaje correctamente gestionadas, estudios realizados en la planta de compostaje de SOIL en Haití han demostrado que patógenos bacterianos habituales como *Prevotella*, *Escherichia* y *Salmonella* spp. se reducen hasta niveles por debajo del límite de detección al concluir la fase termofílica.

Un aspecto relevante en el control del proceso es la relación carbono-nitrógeno (C:N) de la mezcla. Un ratio C:N inicial en torno a 30:1 se considera óptimo para garantizar la actividad microbiana suficiente que genere calor y sostenga la fase termofílica; ratios superiores a 40:1 ralentizan la descomposición por falta de nitrógeno disponible, mientras que ratios inferiores a 20:1 provocan pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco con generación de olores según el estudio *Cornell Compost Chemistry*, publicado por la Universidad de Cornell en 2024. La incorporación de materiales estructurantes ricos en carbono, como la cáscara de arroz o la ceniza de madera, no solo cumple la función de material secante durante la fase de contención, sino que contribuye directamente a la optimización de este ratio en la pila de compostaje. El contenido de humedad de la mezcla debe mantenerse en el rango del 40% y 60%, siendo el límite inferior el umbral mínimo de actividad microbiana y el superior el umbral a partir del cual se generan condiciones anaerobias con producción de metano.

Materiales estructurantes y proporciones de mezcla

El co-compostaje de excretas humanas con materiales estructurantes de origen local constituye una práctica fundamental tanto para la optimización del proceso biológico como para la reducción de costes operativos. Los materiales estructurantes o de relleno cumplen tres funciones simultáneas en la pila de compostaje: aportan la fracción carbonada necesaria para

equilibrar el ratio C:N, crean la porosidad física que favorece la aireación aeróbica y absorben el exceso de humedad del material fecal.

La experiencia de SOIL en Haití es especialmente ilustrativa al respecto. En su sistema, el material recogido en los contenedores se mezcla con bagazo, un subproducto fibroso del procesado de la caña de azúcar, en una proporción de 4:1 en volumen (bagazo:excretas), formando filas de compostaje que se cubren con geotextil permeable para mantener la humedad y prevenir la entrada de vectores (BioCycle, 2024). En el contexto de Kedougou, el bagazo puede ser sustituido por materiales localmente disponibles de características fisicoquímicas equivalentes, como la cáscara de arroz o los residuos de poda y rastrojos agrícolas secos. La ceniza de madera, tal y como se ha señalado en el apartado de contención, puede incorporarse en proporciones moderadas como complemento al material secante, con el valor añadido de su efecto tamponante sobre el pH de la mezcla. Cabe recalcar que las proporciones de mezcla óptimas para los materiales estructurantes disponibles en Kedougou deberían verificarse mediante ensayos piloto durante la fase de implementación del servicio, dado que las características fisicoquímicas de la cáscara de arroz local pueden diferir de las del bagazo empleado en los sistemas de referencia. Se recomienda la medición periódica del ratio C:N y de la temperatura en distintos puntos de la pila como indicadores de control del proceso.



Figura 24 Trabajadores de la organización SOIL durante el vaciado de contenedores.

Fuente: Global Citizen, 2021

Fases del proceso de compostaje y parámetros operativos

El proceso de compostaje termofílico de las excretas recogidas se estructura en cuatro etapas secuenciales, cuya gestión adecuada determina tanto la eficacia en la reducción de patógenos como la calidad agronómica del producto final.

La fase de carga y formación de la pila consiste en la descarga de los contenedores llenos en la zona de tratamiento activo, a la cual se denomina zona roja siguiendo la terminología de SOIL, delimitada físicamente de la zona de producto acabado o zona verde, y su mezcla inmediata con el material estructurante en la proporción establecida. Esta separación física entre zonas es una medida de bioseguridad fundamental que minimiza el riesgo de contaminación cruzada entre material sin tratar y compost maduro.

Durante la fase mesofílica inicial (primeros 3–10 días), los microorganismos mesófilos colonizan el sustrato y comienzan la descomposición de los compuestos más fácilmente degradables, generando calor metabólico que eleva progresivamente la temperatura de la masa. Esta etapa es de corta duración en condiciones de mezcla bien equilibrada, y su correcto desarrollo es determinante para la rapidez del acceso a la fase termofílica.

La fase termofílica activa (semanas 2–10 aproximadamente) es el núcleo del proceso de higienización. La temperatura en el interior de las pilas asciende por encima de los 55 °C, condición letal para la mayoría de los patógenos entéricos. El volteo periódico de las pilas, cuya frecuencia recomendada durante esta fase es de dos veces por semana según SOIL, garantiza que la totalidad del material alcance las temperaturas letales, no únicamente el núcleo central de la pila donde se concentra el calor. La temperatura se monitoriza cada dos días en al menos tres puntos de la pila y a dos profundidades distintas. Según la OMS (2006), el umbral de temperatura mínimo que debe superarse durante al menos siete días consecutivos para garantizar la inactivación de patógenos al nivel exigido es de 50 °C; se aplicarán protocolos que exceden este estándar. La fase termofílica tiene una duración de entre tres y cuatro meses en el núcleo de las pilas, según los datos recabados a partir de los análisis microbiológicos en las instalaciones de Haití.

La fase de curado o maduración representa el periodo de estabilización final del compost, durante el cual la temperatura desciende gradualmente y los microorganismos mesófilos repueblan la masa transformando los compuestos orgánicos más recalcitrantes en humus estable. En los sistemas de compostaje por pilas alargadas (windrow), esta fase tiene una duración adicional de aproximadamente dos a cinco meses, dependiendo de las condiciones

climáticas y de la intensidad de volteo. El método de compostaje en pilas alargadas a cielo abierto reduce el tiempo total del proceso a aproximadamente tres meses frente a los seis a nueve meses del sistema de compostaje en celdas cerradas, con una reducción de costes operativos de entre el 57 % y el 64 % según el análisis comparativo de costes realizado por SOIL en 2022.

Reutilización

La fase de reutilización constituye el eslabón final y más diferenciador de la cadena de servicio, ya que es con la que se consigue materializar el principio de economía circular sobre el que se fundamenta el modelo: la transformación de un residuo considerado peligroso en un recurso agronómicamente valioso. Sin esta etapa, el sistema CBS se reduciría a un simple mecanismo de extracción y eliminación de residuos. Sin embargo, es la comercialización o distribución del producto final lo que cierra el ciclo de nutrientes y confiere al modelo su viabilidad económica parcial, su coherencia ecológica y su relevancia estratégica en el contexto del saneamiento y la seguridad alimentaria, alineándose con el ODS 12, que busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles para reducir la huella ecológica y el uso eficiente de recursos naturales.

Antes de que el compost producido en la planta central pueda destinarse a cualquier aplicación agrícola o de reforestación, es imprescindible verificar que el proceso de higienización ha sido completado con plenas garantías. La Organización Mundial de la Salud, en sus *Directrices para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises en agricultura* de 2006, en el Volumen 4, establece un enfoque de barreras múltiples que combina criterios microbiológicos de calidad del producto final con prácticas de aplicación controlada en campo y formación a los agricultores. En términos de indicadores microbiológicos, el compost derivado de excretas humanas debe alcanzar concentraciones de huevos de helmintos inferiores a 1 por gramo de materia seca y niveles indetectables de Salmonela en 10 g de muestra según el informe de la OMS en 2006. Para verificar el cumplimiento de estos umbrales, se propone implementar un protocolo sistemático de muestreo analítico al final de la fase de curado, antes de la clasificación y distribución del producto, con una periodicidad mínima mensual durante la fase inicial de operación del servicio y trimestral una vez consolidados los parámetros de proceso, con revisiones periódicas aleatorias.

Una vez verificada la inocuidad microbiológica del compost obtenido, el producto debe someterse a una caracterización físico-química que permita determinar su calidad agronómica.

Las excretas humanas contienen macronutrientes esenciales para el desarrollo vegetal en concentraciones aprovechables, destacando el nitrógeno, fósforo y potasio. El proceso de compostaje termofílico modifica significativamente la disponibilidad de estos nutrientes. El nitrógeno orgánico se mineraliza parcialmente durante la fase termofílica, haciéndose más accesible para las plantas, mientras que la concentración de fósforo y potasio tiende a incrementarse en términos relativos conforme se reduce la humedad y la masa total del material. Un estudio publicado en *Waste and Biomass Valorization* en 2017 sobre productos derivados de excretas humanas en Antananarivo, Madagascar, determinó que el compost presentó concentraciones de nutrientes de 23 g/kg, sin efectos perjudiciales sobre el rendimiento de los cultivos en ensayos de campo realizados con abono de origen humano en comparación con fertilizantes químicos convencionales de referencia.

Los fertilizantes derivados de excretas humanas (HEDF, Human Excreta Derived Fertilisers) son fertilizantes orgánicos ricos en nutrientes, renovables, y su uso puede incrementar la disponibilidad de saneamiento y fertilizantes en áreas remotas. No obstante, los resultados de su aplicación dependen del material de origen, los tratamientos aplicados, el tipo de suelo y el cultivo, y es esencial disponer de regulación clara, aceptación pública y educación para garantizar su viabilidad. Esta consideración es muy relevante en el contexto de Kedougou, donde la aceptación social del uso de compost de origen fecal constituye uno de los factores determinantes del éxito del modelo, y donde las estrategias de comunicación e información a agricultores deberán planificarse como parte integrante del componente de reutilización.

Una vez verificada la calidad microbiológica y agronómica, el producto se clasifica, se ensaca y se etiqueta con indicación del contenido aproximado en nutrientes, las recomendaciones de aplicación y la identificación del lote de producción. Esta trazabilidad es un requisito básico de cualquier sistema de garantía de calidad. Permite que, en caso de detectarse alguna no conformidad analítica, identificar y retirar el lote correspondiente antes de su distribución. La presentación en sacos de entre 10 y 25 kg es la más habitual en los sistemas CBS existentes consultados, adaptándose bien al contexto rural de Kedougou, donde el transporte manual y el mercado de agricultores de pequeña escala constituyen el canal de distribución predominante. En el sistema de SOIL en Haití, la instalación de tratamiento produce actualmente aproximadamente 200 toneladas de compost al año, que se comercializan bajo la marca Konpòs Lakay para apoyar iniciativas de producción agrícola y reforestación en todo el país, según datos aportados por la propia organización.

Potencial agronómico y clientes objetivo

La región de Kedougou presenta condiciones agroclimáticas particularmente favorables para la aplicación de compost orgánico. Con una precipitación media anual superior a 1.200 mm concentrada en la estación monzónica entre junio y octubre, y unas temperaturas que favorecen los cultivos tropicales durante gran parte del año, la región dispone de un potencial agrícola significativo que, sin embargo, se ve limitado estructuralmente por la baja fertilidad de los suelos predominantes. En casi todos los casos los suelos son vulnerables a la degradación, con niveles de fertilidad en descenso a medida que aumenta la presión de cultivo.

Ante este deterioro del suelo, la incorporación de compost orgánico procedente del sistema CBS al suelo de cultivo cumple una doble función: por un lado, aporta macronutrientes asimilables que compensan parcialmente la deficiencia de nitrógeno, fósforo y potasio; por otro, incorpora materia orgánica estabilizada que mejora la estructura del suelo, su capacidad de retención hídrica y su actividad biológica, efectos que, a diferencia de los fertilizantes minerales, se acumulan y refuerzan con sucesivas aplicaciones. Mientras que cada aplicación de fertilizante químico agota el suelo, haciendo que la cosecha del año siguiente sea más difícil, el compost tiene el efecto opuesto, construyendo la salud del suelo e incrementando su resiliencia y capacidad productiva año tras año. Esta dimensión acumulativa es especialmente relevante en Kedougou, donde las prácticas agrícolas de subsistencia y los limitados ingresos de los hogares rurales hacen que el acceso a fertilizantes minerales sea escaso: el uso de semillas certificadas y fertilizantes minerales en Senegal se mantiene por debajo del 25% de las parcelas cultivadas, según describe de la Organización de Comida y Agricultura de la Naciones Unidas (FAO), a través de datos obtenidos en la Encuesta agrícola anual entre 2018 y 2019 y publicada por la ANSD en 2020.

Los cultivos predominantes en la región de Kedougou para los que la aplicación de compost de excretas resulta técnicamente pertinente incluyen el arroz de secano y el arroz irrigado de las orillas del río Gambia y sus afluentes, así como el mijo, el sorgo, el maíz, el maní, el algodón y los cultivos hortícolas de huerta periurbana. Para todos ellos, la aplicación de enmiendas orgánicas estabilizadas en el momento de la preparación del suelo, combinada con aportaciones complementarias de fertilizante mineral nitrogenado cuando el cultivo lo requiere, constituye la estrategia de fertilización integrada que maximiza el rendimiento agronómico y minimiza las pérdidas de nutrientes por lixiviación o volatilización, tal y como recomiendan las directrices de la FAO sobre gestión integrada de la fertilidad del suelo (*Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa, 2024*). La aplicación combinada de recursos orgánicos y fertilizantes

minerales está asociada a una mayor eficiencia en el uso de nutrientes y a mayores rendimientos que el uso exclusivo de cualquiera de las dos fuentes por separado.

Respecto a los clientes potenciales del producto, el análisis del mercado objetivo en Kedougou permite identificar al menos cuatro categorías diferenciadas, con distintos perfiles de demanda y canales de acceso. En primer lugar, los agricultores de subsistencia y pequeños productores locales representan el segmento más amplio y de mayor impacto social, se trata de familias rurales que cultivan parcelas pequeñas para autoconsumo, con escasa capacidad de inversión en insumos agrícolas y alta receptividad a soluciones de bajo coste que mejoren sus rendimientos. Este segmento requiere estrategias de sensibilización activa y, posiblemente, esquemas de subvención parcial o distribución subsidiada para asegurar su acceso al producto en las fases iniciales del servicio. La experiencia de SOIL en Haití con su compost Konpòs Lakay documenta resultados directamente comparables: un agricultor de café en las montañas al sur de Trou du Nord señaló que antes de usar el compost, tres meses de sequía eran suficientes para destruir sus plantas, pero tras incorporar Konpòs Lakay, su jardín se mantuvo sano incluso después de siete meses sin lluvia.

En segundo lugar, los proyectos de reforestación y restauración ambiental constituyen un cliente institucional de gran relevancia estratégica. La región de Kedougou, si bien más húmeda que el resto de Senegal, no está exenta del proceso regional de deforestación vinculado a la presión agrícola y a la extracción de leña. Entre las prioridades de mitigación del sector agrícola en Senegal, el gobierno ha identificado el compostaje y la regeneración natural asistida. El Plan para una Senegal Emergente (Plan Sénégal Emergent) refleja una fuerte intención en el desarrollo de patrones de producción y sistemas de comida sostenibles. La aplicación de compost en plantaciones forestales y actividades de restauración de ecosistemas degradados mejora la supervivencia de las plantaciones, la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la capacidad de retención hídrica del sustrato, factores críticos en las fases iniciales del establecimiento de la cubierta vegetal. El compost de Konpòs Lakay ha demostrado ser instrumental en la restauración de ecosistemas y en la mitigación de los impactos del cambio climático mediante el incremento de la retención hídrica del suelo, la restauración edáfica y el secuestro de carbono. Organizaciones no gubernamentales de conservación activas en Kedougou, como aquellas, así como proyectos de la Agence Nationale de la Reforestation et de la Grande Muraille Verte (ANGMV), podrían constituirse en clientes institucionales del compost, integrando su adquisición dentro de los presupuestos de sus actividades de restauración.

En tercer lugar, el sector hortícola periurbano en torno a la ciudad de Kedougou representa un cliente con mayor capacidad de pago y menor necesidad de subsidio, dado que opera en régimen de producción comercial orientada al mercado local. Los productores de tomate, cebolla, pimiento, pepino y hortalizas de ciclo corto, que utilizan intensamente el suelo y que tienen acceso a cierto nivel de riego en la estación seca aprovechando los ríos de la región, son receptivos a insumos que mejoren la productividad de sus cultivos, y su ubicación periurbana facilita la logística de distribución del compost desde la planta central. En Haití, el uso de Konpòs Lakay en parcelas experimentales con cultivos como remolacha y repollo demostró incrementos de rendimiento visibles, lo que llevó a la institución educativa que lo empleaba a optar por el compost de origen fecal en lugar de fertilizantes químicos convencionales.

Finalmente, las instituciones públicas y organizaciones del sector agrícola, incluyendo escuelas con huertos, centros de formación agrícola y cooperativas rurales, conforman un cuarto grupo de demanda con características de adquisición y potencial de pedidos de mayor volumen. En el caso de SOIL en Haití, el Ministerio de Educación adquirió casi tres toneladas métricas de compost Konpòs Lakay para distribuir las en escuelas con huertos a lo largo del país. Este tipo de alianzas institucionales no solo generan ingresos para el servicio CBS, sino que contribuyen a la visibilidad y legitimación social del producto, facilitando su adopción progresiva entre productores privados.



Figura 25 Huerto estudiantil impulsado por compost de SOIL

Fuente: Global Giving, 2018

Acceso a financiación climática

Una dimensión adicional de la fase de reutilización, con creciente relevancia para la viabilidad financiera de los sistemas CBS, es su potencial de mitigación del cambio climático y la posibilidad de acceder a financiación climática mediante la certificación de créditos de carbono. La sustitución de letrinas de pozo, que generan emisiones de metano en condiciones anaerobias, por sistemas CBS con compostaje aeróbico termofílico implica una reducción drástica de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al saneamiento. Un estudio publicado en *Nature Climate Change* en 2020 determinó que las emisiones de metano del sistema CBS de SOIL son entre uno y dos órdenes de magnitud inferiores a las de otras tecnologías de saneamiento, con un potencial de mitigación climática de 126 kg de CO₂-equivalente per cápita al año para habitantes de asentamientos informales. A escala de hogar, esto equivale a casi 800 kg de CO₂-equivalente por hogar y año según datos aportados por SOIL.

La dimensión climática del compost va más allá de la mera reducción de emisiones en origen: la aplicación del producto en suelos degradados contribuye activamente al secuestro de carbono orgánico en el perfil edáfico, refuerza la resistencia de los cultivos a los episodios de sequía, cada vez más frecuentes en el contexto del cambio climático regional, y reduce la dependencia de fertilizantes minerales de síntesis. La CBSA ha identificado formalmente el acceso a créditos de carbono como una vía de financiación complementaria para los operadores CBS, si bien señala que el saneamiento es un bien público esencial que debe financiarse públicamente, y que los créditos de carbono pueden reducir el déficit de financiación, pero no eliminarlo.

El conjunto de aplicaciones identificadas: agricultura de subsistencia, horticultura comercial, reforestación, programas institucionales y, prospectivamente, financiación climática, configura un mercado de reutilización del compost CBS en Kedougou con suficiente diversidad y profundidad como para absorber la producción esperada del sistema en sus distintas fases de crecimiento, y al mismo tiempo para generar los ingresos complementarios que contribuyan a la sostenibilidad financiera del servicio. La gestión estratégica de este mercado, con una segmentación clara de clientes, una política de precios que pueda ajustarse según el perfil del comprador y un programa activo de demostración agronómica en parcelas piloto durante los primeros años de operación constituirá un pilar esencial del modelo de implementación CBS propuesto para la región.

5.2.2. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El sistema CBS que se ha propuesto para Kedougou no ha sido diseñado pensando en los ODS, pero se alinea con varios de ellos de forma directa. Los temas que se han desarrollado a lo largo del trabajo, economía circular, producción de abono, reducción de emisiones, protección de acuíferos y concienciación social, entran de manera natural dentro del marco de la Agenda 2030, ya que la base del sistema CBS propuesto es una solución sostenible, presentada como un servicio para mejorar la calidad de vida de las personas, no simplemente como un negocio. A continuación, se desarrolla cada vínculo de manera concreta.

ODS 2 Hambre cero

El compost producido mediante compostaje termofílico de las excretas recogidas es un fertilizante orgánico aplicable directamente en campo. En Kedougou, donde menos del 25 % de las parcelas utilizan fertilizantes minerales (FAO/ANSD, 2020) y los suelos presentan fertilidad en descenso por la presión continuada de cultivo, este abono mejora el rendimiento de cultivos de subsistencia como el arroz, el mijo y el sorgo. A diferencia del fertilizante mineral, el compost mejora también la estructura del suelo y su retención hídrica de forma acumulativa, lo que mejora la resiliencia de los cultivos frente a los períodos de sequía.

ODS 6 Agua limpia y saneamiento

El CBS de cadena completa es reconocido por el JMP (WHO/UNICEF) como saneamiento gestionado de forma segura desde 2019, contribuyendo directamente a la Meta 6.2. Al confinar las excretas en contenedores herméticos, elimina la infiltración al suelo y protege los acuíferos someros que la población utiliza para consumo doméstico sin tratamiento previo. Reduce la defecación al aire libre y, con ella, la transmisión de enfermedades de origen fecal-oral como el cólera, la disentería o la hepatitis A.

ODS 12
Producción
y consumo
responsables

El modelo CBS materializa el principio de economía circular: transforma un residuo considerado peligroso en un recurso agronómico con valor de mercado. El cierre del ciclo de nutrientes reduce la dependencia de insumos externos, genera un flujo de ingresos complementario para el operador del servicio y disminuye la huella ambiental del saneamiento. La comercialización del compost a agricultores de subsistencia, horticultores periurbanos, programas de reforestación e instituciones públicas configura un mercado local diversificado que contribuye a la sostenibilidad financiera del sistema.

ODS 13
Acción
por el
clima

Las letrinas de foso generan metano por degradación anaerobia, un gas con potencial de calentamiento global 28 veces superior al CO₂ en 100 años (IPCC, 2014). Al transportar rápidamente las excretas a instalaciones de tratamiento aerobio, el CBS interrumpe ese proceso. Según la CBSA y la consultora South Pole, los proyectos CBS eliminan entre el 79 % y el 93 % de las emisiones de GEI de línea base (CBSA, 2025). Un estudio publicado en Nature Climate Change (2020) cifra el potencial de mitigación en 126 kg de CO₂-equivalente por persona y año. La aplicación del compost en el suelo añade una segunda vía de impacto climático: el secuestro de carbono orgánico en el perfil edáfico. La CBSA ha identificado además el acceso a créditos de carbono como vía de financiación complementaria para operadores CBS (CBSA, 2023).

ODS 15
Vida de
ecosistemas
terrestres

La incorporación continuada de materia orgánica estabilizada al suelo frena su degradación y recupera la actividad biológica del suelo. En Kedougou, con presión agrícola creciente y procesos de deforestación vinculados a la extracción de leña, el compost CBS puede ser un insumo útil para los programas de restauración de la ANGMV (Agence Nationale de la Reforestation et de la Grande Muraille Verte). Organizaciones activas en la región han sido identificadas como clientes institucionales potenciales del producto, integrando su adquisición en los presupuestos de revegetación.

El ODS 6 es el eje central del trabajo, del que depende directamente la razón de ser del sistema. Los demás se activan como consecuencia de cómo está diseñado el modelo: el compost apoya la seguridad alimentaria (ODS 2), el tratamiento aerobio reduce las emisiones (ODS 13), la materia orgánica regenera los suelos (ODS 15) y el cierre del ciclo de nutrientes materializa el consumo responsable (ODS 12). La alineación con estos objetivos no es un argumento añadido al final del trabajo: es el resultado de haber tomado, desde el principio, decisiones técnicas orientadas hacia la sostenibilidad.

6. Conclusiones

En este trabajo se han analizado las alternativas de saneamiento aplicables a las zonas rurales de Kedougou, evaluando cuatro tecnologías mediante un análisis comparativo multicriterio. A partir de los resultados obtenidos de este análisis, se ha propuesto un modelo de implementación del sistema CBS, adaptándolo a las condiciones del territorio. Las conclusiones que se extraen se presentan a continuación de forma ordenada.

- El contexto territorial de Kedougou, desarrollado en el estudio, imposibilita la implementación de soluciones de saneamiento centralizadas.
- El método más generalizado en la zona, las letrinas de foso simple, presentan un coste unitario de construcción de aproximadamente 375 €, prohibitivo para la mayoría de las familias de la región, y un riesgo real de contaminación de los acuíferos someros utilizados para consumo doméstico.
- De las cuatro tecnologías evaluadas, ninguna de las basadas en infiltración al terreno ofrece garantías suficientes de protección de fuentes de agua someras. El CBS es la única tecnología que elimina el riesgo de contaminación al no disponer de componente enterrado, y la única reconocida por el JMP como saneamiento gestionado de forma segura sin infraestructura fija.
- El dimensionamiento de la cadena de servicio propuesta contempla contenedores de 20-25 L de HDPE con separación de orina en origen, frecuencia de recogida de dos veces por semana para hogares de 4-6 usuarios, y tratamiento mediante compostaje termofílico co-compostado.
- Los mercados identificados en Kedougou para la fase de reutilización del compost, formada por agricultores de subsistencia, horticultura periurbana, programas de reforestación e instituciones públicas, son suficientemente diversos para absorber la producción esperada en las distintas fases de crecimiento del servicio.
- El sistema CBS reduce entre el 79 % y el 93 % de las emisiones de GEI de línea base respecto a las tecnologías de foso. Esta reducción, junto con el secuestro de carbono derivado de la aplicación del compost en suelos degradados, abre la vía a la certificación de créditos de carbono como fuente de financiación complementaria.

- El principal condicionante para la viabilidad del modelo no es técnico, sino institucional y financiero. El CBS requiere un operador de servicio continuo y una estructura de financiación que no puede depender exclusivamente de las tarifas de los usuarios. La experiencia internacional de la CBSA confirma que algún nivel de financiación pública o filantrópica es necesario, al menos en las fases iniciales del servicio.

6.1. Limitaciones del estudio.

El trabajo se sitúa en el nivel de prefactibilidad. Los parámetros utilizados para el dimensionamiento son basados en referencias bibliográficas internacionales y proyectos CBS en contextos similares, no de datos primarios recogidos en campo. Antes de avanzar hacia una fase de implementación, sería necesario realizar una caracterización in situ de las excretas generadas en la región, una encuesta de aceptabilidad social y un estudio de costes adaptado al mercado local de materiales y mano de obra.

El saneamiento rural en contextos de renta baja, tal como se ha recalado en diferentes ocasiones durante el trabajo, no tiene soluciones simples. Lo que sí existe es evidencia suficiente para afirmar que el CBS es, en las condiciones específicas de Kedougou, la alternativa técnicamente más adecuada y la que ofrece el mayor potencial de sostenibilidad a largo plazo. Que ese potencial se materialice depende, en última instancia, de factores que van más allá del diseño técnico. La voluntad institucional, participación comunitaria y financiación estructural son los mayores retos que se afrontan.

6.2. Reflexión personal

El potencial del sistema CBS en Kedougou es real. Esta región ha sido objeto de ayuda de numerosas asociaciones y entidades, las cuales han favorecido que pueda mejorar la calidad de vida de los habitantes, aportando, en la medida de lo posible, servicios básicos.

Esta presencia durante años ha creado un marco de colaboración humana que facilita la recepción de las comunidades a ideas nuevas. Esto no quiere decir que la asimilación del sistema CBS fuera instantáneo, pero abre las puertas a ello.

Desde mi punto de vista, con la construcción de letrinas, se dan soluciones únicas a problemas puntuales, haciendo un gasto económico que puede ser mejorado en rendimiento a gran escala

a través del desarrollo de un sistema que implemente la economía circular, la creación de empleo, disminución de problemas higiénicos y enfermedades, y mejora de suelos y técnicas de agricultura.

No se puede considerar el sistema de saneamiento como una propuesta únicamente privada. En ningún caso y en ninguna parte del mundo eso funcionaría. El saneamiento ha considerarse como una necesidad básica y un servicio público, siendo la responsabilidad de los órganos competentes colaborar en la mejora de la calidad de vida de sus habitantes, impulsando a su vez el desarrollo local.

7. Referencias bibliográficas

- Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM). (2021). *Bulletin climatique saisonnier janvier–février–mars 2021 (JFM)*.
https://www.anacim.sn/climat/doc/bulletins_climato/2021/bulletin_saisonnier_JFM_2021.pdf
- Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM). (2021). *Bulletin climatique saisonnier juillet–août–septembre 2021 (JAS)*.
https://www.anacim.sn/climat/doc/bulletins_climato/2021/bulletin_saisonnier_JAS_2021.pdf
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). (2020). *Enquête agricole annuelle*. <https://anads.ansd.sn/index.php/catalog/218/pdf-documentation>
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). (2024). *Situation économique et sociale de la région de Kédougou*. https://www.ansd.sn/sites/default/files/2026-01/SES-Kedougou_2024.pdf
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). (2024). *Situation économique et sociale du Sénégal*. <https://www.ansd.sn/sites/default/files/2026-02/SESN%202024.pdf>
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). (2025). *Annuaire population du Sénégal (2024)*. <https://www.ansd.sn/Indicateur/donnees-de-population>
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). (2025). *État et structure, urbanisation et caractéristiques socioculturelles de la population* (Chapitre 1, Rapport RGPH-5).
https://www.ansd.sn/sites/default/files/recensements/rapport/Chapitre-1_ETAT-STRUCTURE-POPULATION-Rapport-def-RGPH-5.pdf
- Cisneros, B. J. (2011). Safe sanitation in low economic development areas. En P. Wilderer (Ed.), *Treatise on water science* (Vol. 4, pp. 147–200). Elsevier.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7158271/pdf/main.pdf>
- Container-Based Sanitation Alliance (CBSA). (2023). *Unlocking carbon credits for sanitation*.
https://cbsa.global/wp-content/uploads/2024/01/Carbon-credit-feasibility-study-policy-brief_24January2024.pdf
- Container-Based Sanitation Alliance (CBSA). (2025). *Saneamiento basado en contenedores: Situación del sector*. https://cbsa.global/wp-content/uploads/2025/09/CBSA_State-of-Sector-report-25_Spanish.pdf

Dimkpa, C., Adzawla, W., Pandey, R., et al. (2023). Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa: An overview of soil health implications. *Frontiers in Soil Science*, 3, 1123931. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1123931>

Eawag/Sandec. (s. f.). *Single ventilated improved pit (VIP)*. Compendium of sanitation systems and technologies. <https://www.emersan-compendium.org/es/tecnologias/technology/single-ventilated-improved-pit-vip>

Engineering for Change. (2024). *Peepoo personal toilet and collection system*. <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/peepoo-collection-system/>

Engineering for Change. (2024). *Clean Team toilet and waste management service*. <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/clean-team-waste-collection-service/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (s. f.). *AQUASTAT: Sistema mundial de información sobre el agua de la FAO*. <https://www.fao.org/aquastat/es/>

Kar, K., & Chambers, R. (2008). *Saneamiento total liderado por la comunidad: Guía de campo*. Institute of Development Studies. <https://www.cltsfoundation.org/wp-content/uploads/2018/06/CLTS-Handbook-Spanish.pdf>

Lamagat, J. P., et al. (1990). *Monographie hydrologique du fleuve Gambie*. ORSTOM (actual IRD). https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-05/010005949.pdf

Morgan, P. (2004). *Plant trials using Fossa Alterna humus*. SuSanA Library. <http://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/977>

Obeng, P. A., et al. (2023). *The ventilated improved pit latrine: A theoretical evaluation of conventional design guidelines, user adaptations and prospects for improvement*. Journal of the Ghana Institution of Engineering (JGhIE) https://www.academia.edu/104390467/Ventilated_Improved_Pit_Latrine_A_Theoretical_Evaluation_of_Conventional_Design_Guidelines_User_Adaptations_and_Prospects_for_Improvement

Reed, B. (2014). *Simple pit latrines* (Technical Brief G025). WEDC, Loughborough University. <https://wedc-knowledge.lboro.ac.uk/resources/booklets/G025-Simple-pit-latrines-online.pdf>

- Reed, B. (2014). *Latrine pit design* (Technical Brief). WEDC, Loughborough University. https://www.susana.org/_resources/documents/default/3-2979-7-1519394648.pdf
- Reed, B. (s. f.). *Ventilated improved pit (VIP) latrines* (Guide 27). WEDC, Loughborough University. <https://wedc-knowledge.lboro.ac.uk/resources/booklets/G027-VIP-latrines-online.pdf>
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). The characterization of feces and urine: A review of the literature to inform advanced treatment technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(17), 1827–1879. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.1000761>
- Ryan, B. A., & Mara, D. D. (s. f.). *Ventilated improved pit latrines: Vent pipe design guidelines* (Technical Advisory Group Note No. 6). World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/412331468199470290>
- Strande, L., Ronteltap, M., & Brdjanovic, D. (Eds.). (2014). *Faecal sludge management: Systems approach for implementation and operation*. IWA Publishing. <https://www.iwapublishing.com/books/9781780404721/faecal-sludge-management>
- Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM). (s. f.). *Fossa alterna*. <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-use/hardware/toilet-systems/fossa-alterna>
- Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM). (s. f.). *Twin pits for pour flush*. <https://sswm.info/factsheet/twin-pits-pour-flush>
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of sanitation systems and technologies* (2.^a ed.). Eawag/Sandec. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202014%20Compendium%20of%20Sanitation%20Systems%20and%20Technologies%202nd%20Revised%20Edition.pdf
- Tilmans, S., Russel, K., Sklar, R., Page, L., Kramer, S., & Davis, J. (2015). Container-based sanitation: Assessing costs and effectiveness of excreta management in Cap Haïtien, Haiti. *Environment & Urbanization*, 27(1), 89–104. <https://doi.org/10.1177/0956247815572746>

Winrock International. (2021). *Senegal country profile: Water, sanitation and hygiene*.
https://winrock.org/wp-content/uploads/2021/08/Senegal_Country_Profile-Final.pdf

World Bank. (s. f.). *Climate change knowledge portal: Senegal*.
<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/senegal>

World Health Organization (WHO). (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Vol. 4. Excreta and greywater use in agriculture*.
<https://www.who.int/publications/i/item/9241546859>

World Health Organization (WHO) & United Nations Children's Fund (UNICEF). (s. f.). *WASH data portal*. <https://washdata.org/data/household#!/table?geo0=region&geo1=sdg>

