



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y BIOCIENCIAS
y
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, INFORMÁTICA Y
TELECOMUNICACIÓN

Trabajo Fin de Máster

**SOLUCIONES ENERGÉTICAS SOSTENIBLES PARA CAMPOS DE REFUGIADOS:
DESARROLLO DE UN MODELO DE SUMINISTRO DE ENERGÍA RENOVABLE
ALTERNATIVA MEDIANTE BIOGÁS Y DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE
MONITORIZACIÓN BASADO EN LA TECNOLOGÍA LORA**

Autor: Felipe Nitsche Villalobos

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ECONOMÍA CIRCULAR

Director/a:

Beatriz Soret Lafraya

Codirector/a:

Francisco Falcone Lanas

Diciembre, 2023

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento a la Universidad Pública de Navarra por financiar este proyecto y por apostar hacia una investigación científica inclusiva que dé respuesta y solución a las necesidades más urgentes de las personas refugiadas y desplazadas, permitiéndoles mejorar su calidad de vida y vivir con dignidad. La intersección de la economía circular y la justicia social es crucial para que las ONGs e instituciones puedan promover la equidad y la inclusión en comunidades afectadas por las crisis.

Del mismo modo, quisiera agradecer a los profesores y profesoras que me han guiado en este camino de aprendizajes y desafíos, en particular, a Beatriz Soret, Francisco Falcone y Natxo Iriogien. Gracias por creer en mi idea, por acompañarme, por aconsejarme y por aportar soluciones con sabiduría y empatía en cada fase de esta investigación. Gracias también por darme la oportunidad de reencontrarme con la ciencia.

Por último, gracias a Annalisa Lenti por sacar lo mejor de mí, por apoyarme y arrastrar con ternura, amor y paciencia estos duros años de estudio y trabajo. A mi abuelo/a materno, que ya no están, pero que han cultivado en mí la necesidad por saber y descubrir. A mi madre, a mi padre por haber viajado 11 mil kilómetros para conocer este proyecto y disfrutar de la satisfacción de haberlo logrado. Por ensañarme el valor de servir a los/las demás, a actuar con justicia social y a no rendirme nunca.

Financiación

Este trabajo ha sido financiado y realizado en colaboración con el departamento de Agronomía, Biotecnología y Alimentación y el departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicación de la Universidad Pública de Navarra.

Resumen

Este trabajo de Fin de Máster se desarrolla con el objetivo de proporcionar soluciones basadas en la naturaleza y en los principios de la economía circular dirigidas a la producción de biogás para proporcionar acceso a energía a la población refugiada y desplazada. Para ello, se ha puesto en marcha un biodigestor prefabricado de una capacidad nominal de 2m³ adaptado a los contextos de campos de refugiados para generar energía térmica para actividades domésticas de cocinado y suministrar materiales estabilizados (digestato) como un biofertilizante para las zonas de cultivo. A su vez, se han incorporado componentes de la transformación digital mediante el monitoreo de los parámetros de control del proceso de biometanización por medio de un sistema inteligente basado en la tecnología LoRa. El sistema se alimentó con biorresiduos procedentes del estiércol y restos alimentarios, dando rendimientos de biogás de entre 680 y 700L por cada 5kg de residuos una vez estabilizado el sistema, permitiendo cocinar alimentos en un tiempo estimado de 80 minutos. El digestato producido como consecuencia de la digestión anaerobia presenta una buena capacidad fertilizante. Dosis de 80ml/maceta de digerido biometanizado aportan resultados similares a fertilizantes convencionales, lo que abre la posibilidad de utilizar el digestato en huertos comunitarios en las zonas donde encuentra instalados los campos de refugiados. Mediante el sistema de monitorización de los parámetros de pH, la temperatura, la HR, el nivel de llenado

de líquido y la detección de CO₂ por medio de la tecnología LoRa, se obtienen paquetes de datos en tiempo real entre 1 y 30 minutos, lo que muestra una alta tolerancia a las interferencias desde la transmisión de los datos emitidos por los nodos y sensores inalámbricos instalados en el biodigestor.

Palabras Clave: Digestión anaerobia; biodigestor; biogás; compost; monitoreo; sensores; internet de las cosas; LoRaWAN; energía en contextos humanitarios; cocina limpia; tecnologías apropiadas.

Abstract

This Master's degree final project was developed with the aim of providing solutions based on the principles of nature and the circular economy, aimed at biogas production to provide access to energy for refugees and displaced populations. To this end, a prefabricated biodigester with a nominal capacity of 2m³, adapted to the context of refugee camps, has been implemented to generate thermal energy for domestic cooking activities and to supply stabilised materials (digestate) as biofertilizer for cultivated areas. In turn, components of digital transformation were incorporated by monitoring the control parameters of the biomethanization process through an intelligent system based on LoRa technology. The system was fed with biowaste from manure and food waste, and once the system was stabilised, biogas yields of between 680 and 700 litres per 5 kg of waste were obtained, allowing food to be cooked in an estimated time of 80 minutes. The digestate produced as a result of anaerobic digestion has a good fertilising capacity. Doses of 80 ml/pot of biomethanised digestate give similar results to conventional fertiliser, which opens up the possibility of using the digestate in community gardens in the areas where the refugee camps are located. The monitoring system of pH parameters, temperature, RH, liquid filling level, and CO₂ detection using LoRa technology provides data packets in real time between 1 and 30 minutes, showing a high tolerance to interference in the transmission of data emitted by the wireless nodes and sensors installed in the biodigester.

Keywords: Anaerobic digestion; biodigester; biogas; compost; monitoring; sensors; internet of things; LoRaWAN; energy in humanitarian contexts; clean cooking; appropriate technologies.

Acrónimos

IA	Inteligencia artificial
ACF	Action Contre la Faim
API	Application Programming Interface
ACNUR	Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados
ACV	Análisis de ciclo de vida
EBA	European Biogas Association
CCA	Clean Cooking Alliance
CAPEX	Capital expenditures
CCVC	Contaminantes climáticos de vida corta
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO2eq	Dióxido de carbono equivalente
EJ	Exajulio
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FO	Fracción orgánica
GEI	Gases de efecto invernadero
GIZ	German Agency for International Cooperation
GLP	Gas licuado del petróleo
GSF	Gold Standard Foundation
GSM	Global System for Mobile communication
Gt	Gigatoneladas
GWP	Global Warming Potential
ha	Hectáreas
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
HDPE	Polietileno de alta densidad
ECHO	European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations
ICRC	International Committee of the Red Cross
IDH	Índice de desarrollo humano
IDPs	Internally displaced persons

IEA	International Energy Agency
ILF	International Lifeline Fund
IoT	Internet of Things
IRENA	International Renewable Energy Agency
LoRaWAN	Low Power Wide Area Network
MS	Materia seca
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
N2O	Óxido nitroso
NRC	Norwegian Refugee Council
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OIM	Organización Internacional para las Migraciones
OFMSW	Organic fraction of municipal solid waste
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONGs	Organizaciones No Gubernamentales
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEX	Operating expenditure
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PBM	Potencial bioquímico de metano
PIB	Producto interior bruto
PMA	Países menos adelantados
PM 2.5	Material particulado 2.5 micrómetros
PVC	Policloruro de vinilo
THP	Pretratamiento térmico o hidrólisis térmica
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos volátiles
SdA	Sustrato de activación
SdE	Sustrato de estabilización
SAFE	Safe Access to Fuel and Energy
SSWM	Sustainable sanitation and water management
SUMS	Stove Use Monitoring Systems

UE	Unión Europea
UNEP	United Nations Environment Programme
UNHCR	United Nations High Commissioner for Refugees
WEF	World Economic Forum
WFP	World Food Programme
WHO	World Health Organization

Índice

1. Introducción	6
2. Antecedentes	7
2.1 Acceso a energía térmica en campos de refugiados y desplazados	8
2.2 Acceso a la cocina limpia	11
2.3 Impacto de la cocina limpia en la refrigeración ecológica	12
2.4 Gestión de los residuos sólidos	13
2.5 Riesgos derivados de la ausencia de gestión de residuos sólidos en campos de refugiados	14
2.6 Jerarquía de residuos	14
2.7 Rol de la economía circular en la generación de biogás.....	15
2.8 Circularidad en el ámbito humanitario y su contribución a la biosfera.....	16
2.9 Digestión anaeróbica para la producción de biogás	18
2.9.1 Parámetros ambientales y operacionales	19
2.9.2 Sustratos y rendimiento del biogás	20
2.9.3 Tecnologías de biodigestores domésticos y comunitarios	22
2.9.4 Implementación de sistemas de biodigestión en contextos humanitarios	25
3. Sostenibilidad del uso de biogás en la cocina limpia	27
3.1 Beneficios socioeconómicos	27
3.2 Beneficios medioambientales.....	30
4. El IoT y transformación digital en el mundo humanitario	31
4.1 Solución para el control y monitoreo del biogás	32
4.2 Tecnología LoRaWAN.....	33
4.3 Aplicación de la gestión remota	34
5. Planteamiento del trabajo y objetivos	34
6. Experimental	35
6.1 Diseño del experimento.....	35
6.2 Sistemas empleados para la producción de biogás.....	36
6.2.1 Sistema de digestión anaerobio discontinuo a escala de laboratorio.....	36
6.2.2 Sistema de digestión anaerobio semicontinuo de carga por lote a escala domiciliaria	37
6.3 Caracterización de materias primas e inóculos	39
6.3.1 Determinación de sólidos totales por análisis gravimétrico	39
6.3.2 Sustratos de origen animal para la biodigestión anaeróbica	40

6.3.3 Biorresiduos para la biodigestión anaeróbica.....	41
6.4 Método experimental para el ensayo fertilizante: bioensayo de cultivo.....	41
6.4.1 Materia vegetal y fertilizantes	41
6.4.2 Ciclo del cultivo	43
6.4.3 Dosificación de los fertilizantes	43
6.4.4 Dosificación de los fertilizantes	44
6.5 Sistema de monitorización basado en el protocolo LoRaWAN.....	45
6.5.1 Selección de sensores y microcontroladores	45
6.5.2 Programación.....	47
6.5.3 Implementación	49
6.6 Análisis de datos.....	50
7. Resultados y discusión	51
7.1 Caracterización de los inóculos y los residuos utilizados a escala de laboratorio.....	51
7.2 Caracterización de los inóculos, las mezclas y sustratos utilizados en el digestor HomeBiogas 2.0	52
7.3 Producción de gas y monitoreo parámetros en digestor a escala de laboratorio	53
7.4 Producción de biogás y monitoreo de parámetros del digestor HomeBiogas 2.0	54
7.5 Producción de biogás para el cocinado y monitoreo de fugas de CO ₂	56
7.6 Bioensayo de crecimiento vegetal	58
7.6.1 Número de hojas.....	58
7.6.2 Biomasa y peso seco.....	59
7.7 Sensorización	60
7.7.1 Detección del nivel de llenado del biodigestor.....	60
7.7.2 Detección de CO ₂ durante el cocinado y por fugas del sistema	60
7.7.3 Monitoreo de temperatura y pH	61
7.8 Aplicación del biodigestor a contextos humanitarios y posibilidades de escalado	62
7.9 Oportunidades de digitalización de procesos	63
7.10 Identificación de retos y oportunidades.....	64
8. Conclusiones	65
9. Biblografía	67
10. Anexos.....	83

Índice de Anexos

Anexo 1 Diagrama de conexión y códigos programación sensores	83
Anexo 2 Localización biodigestor y distancia de Red LoRa	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Tasa de deforestación debido al flujo de personas refugiadas en los países de acogida..	9
Tabla 2 Resultados esperados para algunos indicadores empleados para monitorizar la producción de emisiones de GEI y residuos sólidos durante las operaciones de respuesta, suministro y entrega de la ayuda humanitaria en los campos de refugiados y las comunidades de acogida	18
Tabla 3 Características de algunos sustratos típicos para biodigestores de países en vías de desarrollo.....	21
Tabla 4 Materiales reciclables, recuperables e ingresos obtenidos de la recogida de residuos en los campos de refugiados rohingya en Cox's Bazar	30
Tabla 5 Secuencia y composición de <i>batch</i> de alimentación del digestor.....	37
Tabla 6 Dosis de los fertilizantes aplicados a las macetas	44
Tabla 7 Frecuencia de transmisión de datos y rangos operativos programados para los ensayos de laboratorio	48
Tabla 8 Frecuencia de transmisión de datos y rangos operativos programados para los ensayos en la finca de prácticas.....	48
Tabla 9 Caracterización del inóculo utilizado en el ensayo.	51
Tabla 10 Caracterización fisicoquímicas de los diferentes sustratos y mezclas empleadas en el ensayo	52
Tabla 11 Características fisicoquímicas del sustrato digerido.....	53
Tabla 12 Producción volumétrica de biogás con los sustratos utilizados.....	56
Tabla 13 Pruebas de cocinado (P): cantidad de alimento y tiempos de cocinado para distintos tipos de preparación de alimentos.	57

Índice de Figuras

Figura 1. Países con programas de energía limpia	8
Figura 2. Mujer preparando fuego para cocinar. Asentamiento de refugiados en Nakivale, Uganda	10
Figura 3. Población sin acceso a cocinas limpias y escenarios de emisiones netas cero, 2000-2030	11
Figura 4. Impacto de la cocina limpia en el cambio climático y la salud de las personas.....	12

Figura 5. Tres pasos para la refrigeración ecológica: restauración, conservación y mejora de la gestión de los ecosistemas naturales	13
Figura 6. Relación entre la generación de residuos y el PIB	13
Figura 7. Jerarquía de residuos en contextos humanitarios y su comparación con el enfoque jerárquico de residuos de acuerdo con la Directiva Marco de residuos de la UE	15
Figura 8. Representación del ciclo biológico dentro del diagrama de mariposa de la economía circular	16
Figura 9. Fases de la digestión anaeróbica	19
Figura 10. Curvas de rendimiento CH ₄ en función del TRH y el pretratamiento de PS y WAS	22
Figura 11. Principales modelos de biodigestores usados en países en vías de desarrollo y PMA	23
Figura 12. Biodigestor de cúpula fija (a) Campo de refugiados de Cox's Bazar en Bangladés, (b) Campo de refugiados de Mpaka, Suazilandia, (c) Biodigestor tubular en Kenia región de Meru, Nyeri, Kericho	24
Figura 13. Biodigestor doméstico en tambor de PVC, Haití y Prototipo experimental con sistema de sensorización	25
Figura 14. Sistema de producción de biogás en contextos humanitarios	25
Figura 15. Mujer cocinando con biogás. Asentamiento de refugiados en Nakivale, Uganda	25
Figura 16. a) Funcionamiento biodigestor portátil HomeBiogas, b) Sistema de producción de biogás en el campo de refugiados de Tongogara, Zimbabwe	27
Figura 17. Beneficios económicos de proyectos de biogás para uso doméstico y estufas a combustión en relación con los ODS 1, 2, 8, 13 y 15	29
Figura 18. Esquema general de monitoreo de los parámetros de un biodigestor mediante IoT..	32
Figura 19. Red LoRaWAN.....	33
Figura 20. Fases del diseño del experimento.....	36
Figura 21. Digestor anaerobio discontinuo de una sola etapa y sistema de sensorización con control de temperatura y pH (dentro del digestor), de gases (en el primer matraz) y de nivel líquido (en el segundo matraz y en la probeta).....	36
Figura 22. Esquema general del montaje del biodigestor HomeBiogas 2.0	38
Figura 23. Esquema de las fases de funcionamiento del digestor	39
Figura 24. A y B: Muestras y pesaje de materia seca después del secado; C y D: muestras y cenizas después de la ignición	40
Figura 25. A y B: Sustrato inicial en húmedo; C: sustrato inicial deshidratado; D: báscula de humedad	41
Figura 26. A. Biorresiduo; B. Biorresiduo alimentado al biodigestor.....	41
Figura 27. Plántulas de lechuga utilizadas en el bioensayo.....	42
Figura 28: Esquema experimental del bioensayo de cultivo de lechuga	43
Figura 29. Ciclo del bioensayo de lechuga.....	43

Figura 30. Crecimiento del cultivo de lechuga con los abonos aplicados.....	44
Figura 31. Determinación del peso seco de la lechuga luego del secado en estufa.....	45
Figura 32. Sensores, microcontroladores y analizadores utilizados para el monitoreo y control del bioprocreso de digestión anaerobia	47
Figura 33. A. Declaración de variables y programación módulo Arduino y sensor CO ₂ ; B. Visualización sensor de pH y temperatura en la aplicación de Cayenne	49
Figura 34. Diagrama de comunicación LoRaWAN implementando en el proceso de digestión anaeróbica con HomeBiogas2.0 y a escala de laboratorio	50
Figura 35. Caja de protección para Arduino, pines de conexión y batería.....	50
Figura 36 Evolución del pH y la temperatura (a) y el CO ₂ (b) durante el proceso de digestión anaeróbica a escala de laboratorio y visualización de los parámetros entregados por los sensores en Cayenne (c).....	54
Figura 37 Evolución del pH y la temperatura (a), sólidos totales y sólidos volátiles (b) durante el proceso de digestión anaeróbica y aspecto del gasómetro con producción mínima y máxima de biogás (c)	55
Figura 38. Variación de temperatura durante la generación de biogás	55
Figura 39 Concentración de CO ₂ y de CH ₄ presente en el biogás medido por medio de un detector de CO ₂ de alta concentración EXTENDAPAK® 6.0.....	56
Figura 40. Pruebas de cocinado con distintos tipos de alimentos	57
Figura 41. Emisión de CO ₂ durante el cocinado de alimentos	58
Figura 42 a. Perspectiva visual del crecimiento del cultivo	59
Figura 42 b. Evolución del número de hojas según tipo de abono.....	59
Figura 43. Peso de seco del bioensayo de lechuga según tipo de abono	59
Figura 44. Monitoreo y alerta del nivel de llenado del biodigestor.....	60
Figura 45. Monitoreo de CO ₂ y fugas de biogás del sistema.....	61
Figura 46. Monitoreo y lecturas de pH y temperatura durante la fase de activación del digestor	61

1. Introducción

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 establece que se debe garantizar el acceso a una energía asequible, segura y sostenible para todos, mientras que el ODS 12, enfocado en alcanzar modelos de producción y consumo sostenibles, incluye entre sus metas la adecuada gestión de los residuos, reduciendo su producción y la utilización eficiente de los recursos naturales, lo que convierte a la economía circular en una alternativa viable para el logro de los ODS (van Kruchten & van Eijk, 2020). En entornos de desplazamiento forzado y en un mundo cada vez más afectado por el cambio climático, esto supone un reto cada vez más importante, ya que la mayor parte de los campos de refugiados se establecen en zonas remotas y en contextos rurales y aislados de las redes eléctricas y del acceso a la tecnología y la conectividad. Así, en cuanto a los sistemas energéticos fuera de la red convencional, ya se ha establecido una nueva dimensión llamada “soluciones de energía limpia” para la sostenibilidad de los campos de refugiados basada en la bioingeniería; estas soluciones pueden ser ventajosa para satisfacer demandas energéticas básicas en los campamentos garantizando la salud y los medios de vida y seguridad alimentaria de las personas refugiadas y desplazadas (Pollock et al., 2019). Por otro lado, el Banco Mundial reporta que cerca de la mitad de la población mundial no utiliza un servicio de internet móvil, pese a vivir en zonas con cobertura de banda ancha móvil (Banco Mundial, 2022), y que dicha falta de acceso, en su gran mayoría, corresponde a regiones y países “menos adelantados” o PMA¹ (ONU, 2016) con un bajo índice de desarrollo humano (IDH), en general, inferiores a 0,55 dentro de una escala de 0 a 1 (PNUD, 2022).

Las tecnologías que utilizan residuos para la generación de energía térmica mediante biomasa es una práctica cada vez más extendida en el ámbito humanitario. Estas tecnologías frecuentemente deben hacer frente a múltiples retos relacionados con la disponibilidad y gestión de los residuos, los costes de implementación y funcionamiento, la escasez de personal cualificado para gestionar el proceso y el suministro adecuado de energía ante la creciente demanda relacionada con el crecimiento de la población y también con la falta de regulación medioambiental (Mutz et al., 2017). No obstante, el aprovechamiento y utilización de los residuos, en particular los orgánicos, presenta un gran potencial para suplir las fuentes de energía primaria y hacer frente a efectos perjudiciales relacionados a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) derivados de su eliminación inadecuada.

La expansión e implementación de biodigestores anaerobios que capturan y potencian la formación de biogás como combustible a partir de residuos orgánicos, representa un enfoque viable para hacer frente al tratamiento de residuos orgánicos generando beneficios sociales, económicos y medioambientales. Las experiencias realizadas por el Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y otros actores humanitarios fundamentan este trabajo de fin de máster, el cual pretende analizar el rol del biogás como un recurso energético renovable para satisfacer las necesidades de cocinado en los campos de personas refugiadas y desplazadas, a la par que se utiliza el enfoque de la economía circular en cuanto a la valorización de los residuos orgánicos y el uso de biomateriales en cascadas, promoviendo procesos eficientes de digestión anaeróbica y de obtención de bio-abono como subproducto. Por otro lado, el trabajo incluye el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros que permiten un adecuado control del proceso de biometanización.

Para alcanzar el objetivo indicado, se ha llevado a cabo la puesta en marcha de un prototipo de biodigestor prefabricado a escala doméstica utilizando sustratos similares a los disponibles en contextos humanitarios para la generación de biogás y su conversión en energía térmica para el cocinado. Por otro

¹ Esta categoría fue establecida oficialmente en 1971 por la Asamblea General de las Naciones Unidas y está integrado por 48 países descritos por la ONU como el sector más pobre y débil de la comunidad internacional.

lado, se ha analizado la capacidad fertilizante del abono orgánico resultante de la digestión mediante un bioensayo de cultivo. Asimismo, se han monitoreado y evaluado los parámetros fisicoquímicos del proceso como el pH, la temperatura, la concentración de CH₄ y CO₂ y el nivel de llenado del biodigestor (lodo de digestión) mediante el desarrollo de una aplicación acoplada a un sistema inteligente de registros de lectura en tiempo real de los parámetros basado en la tecnología “Low Power Wide Area Network” (LoRaWAN), que se adapta bien a zonas remotas y que permite un enlace de comunicación viable y energéticamente eficiente a largas distancias.

2. Antecedentes

Se estima que existen 450 campos de refugiados y desplazados en todo el mundo, pero la cifra podría llegar a 600 considerando asentamientos no oficiales (Manni et al., 2018). De acuerdo con el ACNUR, el número de personas que se ven forzadas a huir de sus hogares no solo ha ido en aumento año tras año en la última década, sino que también se encuentra en el nivel más alto desde que se tiene registro. A finales del 2021, según el informe anual de Tendencias Globales de ACNUR (ACNUR, 2022), el número de personas desplazadas por las guerras, la violencia, la persecución y las violaciones a los derechos humanos ascendía a 89,3 millones, es decir, un 8% más en comparación con el año anterior y más del doble en relación con la cifra de hace diez años (UNHCR, 2022b). En 2022, las cifras continuaron en aumento debido a conflictos nuevos y existentes, situándose en 108,4 millones de personas desplazadas por la fuerza.

Durante décadas, los campos de refugiados han sido la principal respuesta de albergue temporal ante una emergencia humanitaria como un “espacio seguro”, garantizando la seguridad de las personas. Sin embargo, con frecuencia, estas instalaciones temporales terminan convirtiéndose en asentamientos a largo plazo con poblaciones que a menudo equivalen a ciudades medianas e intermedias de hasta 860.000 habitantes (Martínez Euklidiadas, 2022) con economías propias y sistemas de gobierno e instituciones cívicas (UNHCR, 2022c). El ACNUR estima que más de la mitad de los refugiados se encuentran en situaciones prolongadas y que una persona refugiada puede pasar hasta 17 años de su vida en el exilio (UNHCR, 2014b).

Los efectos del desplazamiento forzado conllevan graves consecuencias en la vida de las personas, generando la perdida de bienes y el acceso a servicios básicos. En ese sentido y, considerando el escenario de las crisis prolongadas, diversos actores humanitarios intentan proporcionar a estas personas servicios básicos como alojamiento, provisión de alimentos, agua y protección, así como asistencia en salud y educación con un enfoque basado en la sostenibilidad y el bienestar humano (UNHCR, 2017). Sin embargo, las intervenciones humanitarias están expuestas a grandes retos. Uno de ellos son los programas relacionados al acceso a energía. Por ello, y en consonancia con el Pacto Mundial sobre los Refugiados, los programas de energía del ACNUR se están centrándose en ampliar el desarrollo de capacidades locales para la implementación de tecnologías inteligentes, asequibles y apropiadas mediante soluciones de energías renovables en los países en vías de desarrollo y PMA que acogen a las personas refugiadas y desplazadas (ACNUR, 2019). En esta línea, y desde 2021, el ACNUR, está proporcionando soluciones de cocina limpia de acuerdo a las directrices establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS- WHO, 2021) principalmente en países de África y de Asia Meridional (Figura 1), poniendo a prueba proyectos de energía innovadores que contribuyen al cuidado del medio ambiente y a mejorar los medios de vida y la resiliencia de las personas más vulnerables (UNHCR, 2021).

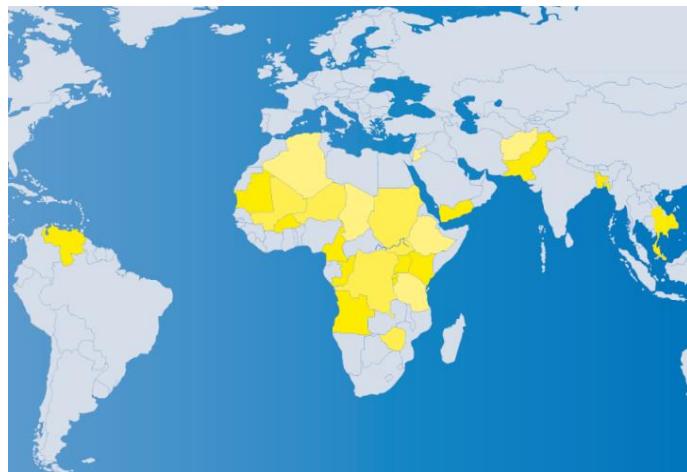


Figura 1. Países con programas de energía limpia
(UNHCR, 2021)

2.1 Acceso a energía térmica en campos de refugiados y desplazados

En la mayor parte de los campos de refugiados y desplazados existen necesidades relacionadas con el acceso a la energía térmica, tanto a nivel doméstico como comunitario. Este tipo de energía es esencial para cocinar, calentarse e iluminar los espacios comunes y de convivencia familiar. El uso de energía térmica también tiene un impacto económico en los medios de vida de las personas mediante la creación de actividades generadoras de ingresos o de pequeños negocios como venta de comida callejera (usualmente instaladas en ferias), restaurantes populares, panaderías y pastelerías. Estudios realizados por el ACNUR, muestran que alrededor del 97% de las personas que viven en campos de refugiados y desplazados tienen acceso casi nulo a la electricidad y que, al menos, el 80% depende de la leña para cocinar y calentarse (UNHCR, 2023c). Con el objetivo de dar respuesta a esta situación, el ACNUR desarrolló una estrategia global cuatrienal de acceso seguro a los combustibles y a la energía llamada SAFE (UNHCR, 2014a). Dicha estrategia intenta integrar las necesidades energéticas en la planificación y la respuesta humanitaria, así como mejorar la comprensión del impacto socioeconómico que tienen las intervenciones energéticas en las poblaciones que experimentan desplazamiento forzoso. En ese sentido, la estrategia global, así como evaluaciones puntuales realizadas en estos términos con anterioridad en Tanzania (Rivoal & Haselip, 2017), reportan los siguientes problemas relacionados con el acceso a energía térmica para cocinar:

- **División del trabajo por género.** En general, son las mujeres y las niñas las encargadas de la recolección de la leña usada como combustible para cocinar, que, por lo general, deben recorrer grandes distancias exponiéndose a agresiones y abusos físicos y sexuales (Patrick, 2007).
- **Medios de vida.** Dado que son las mujeres, los niños y las niñas las encargadas de satisfacer las propias demandas energéticas de los hogares y la generación de ingresos desde la recolección de leña para poner en marcha pequeños negocios, este tipo de tareas impiden que los niños y las niñas asistan a la escuela como un espacio seguro. Además, la inasistencia a la escuela debido estas labores merma el derecho a la educación como una fuente generadora de oportunidades y una de las vías fundamentales de la superación de la pobreza. Durante la etapa adulta, las labores de recogida también impiden que las mujeres puedan dedicar tiempo a actividades económicas productivas como la agricultura, la costura y la artesanía.
- **Daño al ecosistema.** La recolección de leña para cocinar puede provocar la deforestación o la destrucción de los espacios verdes, impactando en los ecosistemas alrededor de las zonas donde

se encuentran los campos de personas refugiadas y desplazadas. A nivel mundial, se estima que más de 25.900 ha de bosques son quemados cada año por familias refugiadas y desplazadas que viven en campamentos (Barbieri et al., 2017). En la Tabla 1 se pueden observar algunos impactos medioambientales documentados relacionados a la tasa deforestación en países de acogida debido al flujo de personas refugiadas.

Tabla 1. Tasa de deforestación debido al flujo de personas refugiadas en los países de acogida (Chowdhury et al., 2022)

Ubicación	Origen	Número de personas	Periodo de referencia	Tasa de deforestación
Sudán (Darfur)	Sudán	2 millones	2003-2008	La tasa de consumo de leña se calcula en 1.500 toneladas diarias
RDC (Región de Virunga)	Ruanda	≈730.000	1994-1996	La tasa de consumo de leña se calcula en 1.000 toneladas diarias
Tanzania (Noroeste)	Ruanda	524.000	1994-1996	La tasa de consumo de leña se estima en 585.000 m³ al año en el distrito de Ngara
Zimbabue	Mozambique	-	1985-1994	Reducción del 58% de la cubierta vegetal alrededor del campo
Malawi	Mozambique	> 1 millón	1985-1995	La tasa de consumo de leña se estima entre 500.000 y 700.000 m³ anuales.

- **Seguridad alimentaria y nutrición.** La inseguridad alimentaria conduce inevitablemente a la inseguridad nutricional y, por ende, a un deterioro generalizado de la salud humana debido a infecciones y otras enfermedades relacionadas con la desnutrición y por la falta de tecnologías apropiadas para utilizar y gestionar los alimentos de forma segura y adecuada (Albert, 1999). Además, esto contribuye al aumento de la mortalidad y crea una situación de emergencia permanente (Herrera-Cuenca et al., 2022). En contextos humanitarios, la mayor parte de los alimentos suministrados desde programas de ayuda alimentaria tienen que ser preparados antes de su consumo en los hogares, puesto que el cocinado mejora la biodisponibilidad de los alimentos, y por tanto la nutrición, contribuyendo a prevenir enfermedades. No obstante, en algunos países como Sudán del Sur y Níger, los alimentos son cocinados con agua hervida 3 o 4 veces al día. En este último país, la evidencia muestra que, debido a los largos tiempo de cocción y la falta de acceso a combustible basado en la leña, las raciones se consumían secas, reduciendo su valor nutricional, o cocinadas en agua sin hervir, aumentando el riesgo de infecciones (Haver et al., 2013). En algunos casos, las familias también suelen intercambiar o vender sus raciones de alimentos para obtener leña, disminuyendo su ingesta alimentaria diaria.
- **Salud y emisiones.** En general, y como se ilustra en la figura 2, las cocinas en los campos de refugiados suelen ser bastante rudimentarias y la combustión se realiza a fuego abierto causando

problemas de salud derivados de la inhalación de humos tóxicos. La OMS estima en 3,8 millones las muertes prematuras al año relacionadas con enfermedades como la neumonía, el cáncer de pulmón y otras patologías a causa de la contaminación del aire en los interiores de los hogares, con un nivel de mortalidad mayor que la malaria y afectando principalmente a las mujeres (WEF, 2021). En el campo de refugiados de Nyarugusu en Tanzania, las infecciones respiratorias por contaminación del aire en los hogares representan la tercera causa de mortalidad del campamento (Rivoal & Haselip, 2017).

La combustión de combustibles sólidos, desde sustratos como la leña, los residuos de los cultivos agrícolas, el carbón y el queroseno, genera emisiones de contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) como el carbono negro, así como gases de efecto invernadero (GEI), además de gases tóxicos como el CO emanado por combustiones deficientes durante el cocinado. Las partículas de carbono negro u hollín absorben la luz solar, calentando la atmósfera e impactando en el calentamiento global. Alrededor del 25% de las emisiones de carbono negro a nivel mundial procede de actividades de cocinado, de las cuales entre el 60% y el 80% proceden de hogares en países de medianos y bajos ingresos (CCA, 2023).



Figura 2. Mujer preparando fuego para cocinar. Asentamiento de refugiados en Nakivale, Uganda (WFP & ILF, 2019)

- **Refugio.** En algunos contextos la construcción o la manutención estructural de los refugios temporales se realiza con madera, como es al caso de los campos de refugiados al norte de Tailandia (Nikhrothanon, 2014), compitiendo directamente con la leña para cocinar. El uso de madera como material de construcción puede reducir de manera significativa el suministro de la leña adyacente a los campos, obligando a las mujeres y las niñas a caminar grandes distancias para buscar leña para cocinar y calentarse, incrementando los niveles de inseguridad y desprotección.
- **Conflictos.** En entornos humanitarios, el problema del acceso a energía o combustibles adecuados para cocinar está directa o indirectamente relacionada con situaciones de conflicto entre las personas refugiadas y las comunidades de acogida debido al uso excesivo de los recursos naturales. La afluencia de personas refugiadas ha provocado un aumento en la tasa de degradación de los bosques y del suelo ya existente, en virtud de la demanda de leña para cocinar. Tanto los hogares de las personas refugiadas como los de las comunidades de acogida

dependen de la leña para cocinar, tensionando las relaciones comunitarias entre ambos grupos debido a la competencia por los recursos naturales disponibles (Gianvenuti et al., 2022).

De cara al cumplimiento de los objetivos de la Agenda 2030, estos obstáculos relacionados con el acceso a la energía requieren respuestas innovadoras y climáticamente inteligentes² que cuenten también con el compromiso del sector público-privado, de modo que se garantice el acceso a una energía asequible, segura y sostenible como indica el ODS 7, así como la adecuada gestión de los residuos, la utilización eficiente de los recursos disponibles y la reducción de emisiones contaminantes (ODS 12). La responsabilidad compartida de los Estados y de la comunidad internacional asumidas en la Declaración de Nueva York (UNHCR, 2018), refuerza el cumplimiento de los ODS, en tanto que facilita las respuestas humanitarias desde enfoques sostenibles que inviertan en la resiliencia de las personas desplazadas y refugiadas, así como en las comunidades de acogida. En ese sentido, las soluciones de energía renovable en estos contextos podrían ser cruciales para garantizar un acceso efectivo y constante a servicios fundamentales como la cocina limpia y la conservación de los alimentos.

2.2 Acceso a la cocina limpia

El concepto de cocina limpia se refiere al uso de combustibles más limpios y cocinas energéticamente eficientes donde la energía térmica convertida en gas o energía eléctrica se transfiere a los alimentos que se van a cocinar. Se estima que, en la actualidad, más de 2.500 millones de personas carecen de acceso a cocinas limpias o libres de la contaminación por combustibles fósiles o biomasa tradicional. Aunque los últimos datos muestran un aumento del acceso a cocinas limpias, no ha sido suficiente para ir por delante del crecimiento de la población, especialmente en África subsahariana (figura 3). Además, la pandemia de Covid-19 ha ralentizado los avances de acceso a instalaciones de cocinas limpias en un 1% entre 2019 y 2021, lo que aleja a muchos países de la meta hacia un acceso universal de energía asequible, segura y sostenible (IEA, 2023). En la práctica, se estima que unos 2.100 millones de personas seguirán sin acceso a cocinas limpias en 2030, lo que requerirá una aceleración significativa de los proyectos encaminados a la reducción de emisiones de GEI en este ámbito.

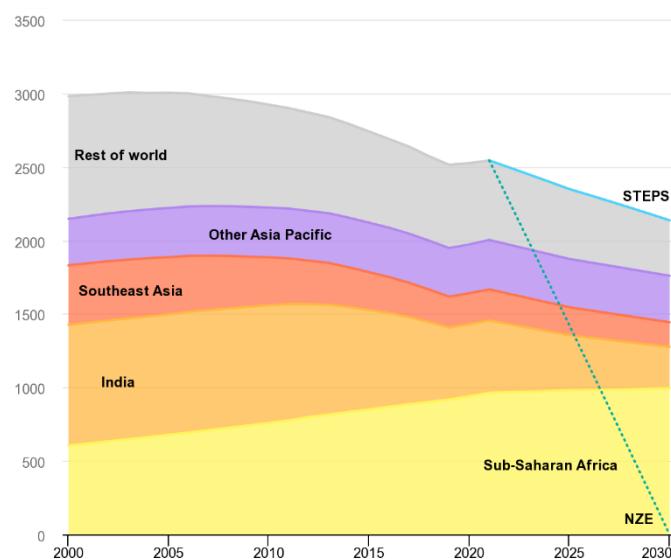


Figura 3. Población (millones de personas) sin acceso a cocinas limpias y escenarios de emisiones netas cero (NZE), 2000-2030 (IEA, 2023)

² En este trabajo se utiliza el concepto de respuestas o soluciones climáticamente inteligentes para designar las soluciones basadas en la naturaleza y dentro del ciclo de la economía circular.

A medida que los tipos de cocina evolucionan a lo largo de la escala energética en los países en vías de desarrollo conforme aumentan los ingresos, la transición hacia una cocción limpia asociada a soluciones climáticamente inteligentes se convierte en una estrategia viable para conseguir una mitigación eficiente de las emisiones de los GEI y mejorar los medios de vida de las personas y comunidades que viven en los PMA. La figura 4 muestra distintos tipos soluciones para el cocinado y el nivel de impacto que cada solución tiene sobre el medioambiente y la salud humana. En la figura se puede apreciar que las soluciones basadas en la producción de biogás presentan un bajo impacto sobre el cambio climático y proporcional al bajo riesgo y efectos perjudiciales para la salud de las personas en comparación con el uso de leña o biomasa forestal.



Figura 4. Impacto de la cocina limpia en el cambio climático y la salud de las personas (CCA, 2022)

Estos indicadores de impacto están en consonancia con las directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire y la quema de combustibles en los hogares, en particular sobre las emisiones de material particulado 2.5 (PM 2.5) y CO, asociados a numerosos efectos negativos sobre la salud como el incremento de enfermedades respiratorias (WHO, 2021). Del mismo modo, estas emisiones transportadas por acción del viento pueden depositarse en el suelo o el agua, causando efectos perjudiciales sobre la diversidad de los ecosistemas e impactando negativamente sobre el clima (EPA, 2018).

2.3 Impacto de la cocina limpia en la refrigeración ecológica

La cocción limpia de los alimentos mediante biogás no solo desempeña un papel importante a la hora de evitar emisiones de GEI, sino que también incide directamente en la conservación de la biodiversidad y en la mitigación de los impactos a consecuencia de la degradación del suelo debido al menor uso de leña, lo que reduce la deforestación, particularmente, desde una menor extracción y recolección de leña para cocinar, protegiendo los ecosistemas y reduciendo la liberación de carbono. Se contribuye así a la denominada “refrigeración ecológica” o conjunto de soluciones basadas en la naturaleza para evitar que el incremento de temperatura global supere los 1,5°C establecidos en el Acuerdo de París (UNFCCC, 2023) (Figura 3).

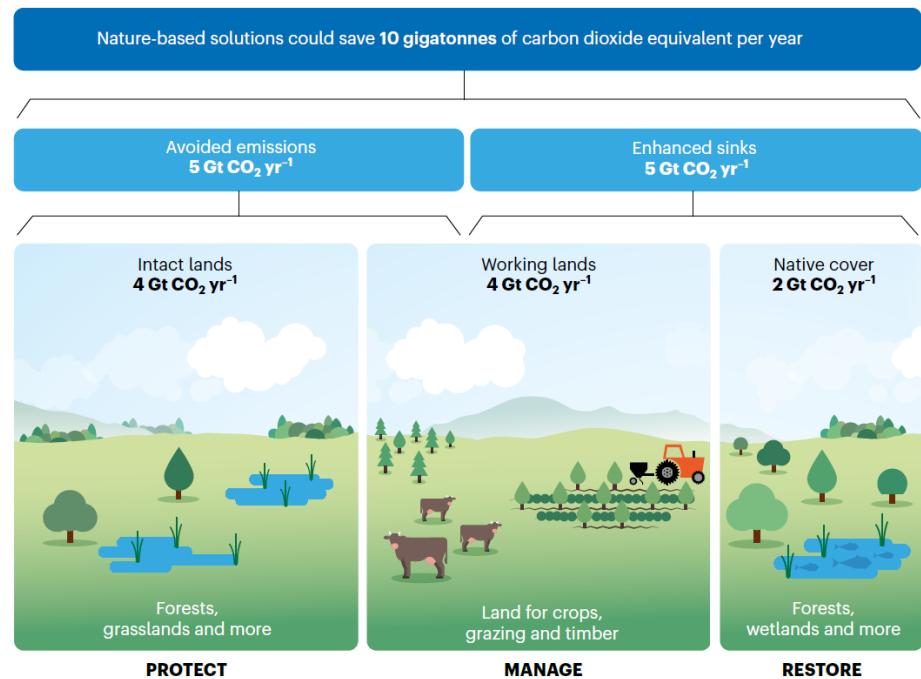


Figura 5. Tres pasos para la refrigeración ecológica: restauración, conservación y mejora de la gestión de los ecosistemas naturales (Girardin et al., 2021)

2.4 Gestión de los residuos sólidos

La gestión de los residuos sólidos es un tema transversal y que afecta de manera global a todas las personas. El aumento del crecimiento demográfico - en particular en África, (ONU, 2018) - , así como la rápida urbanización y el actual modelo de consumo, está dando lugar a niveles preocupantes de generación residuos los últimos años y en las proyecciones para el año 2050 de acuerdo a los informes y datos proporcionados por el Banco Mundial (World Bank, 2018).

Actualmente, se generan aproximadamente 2.010 millones de toneladas métricas de residuos urbanos anuales en todo el mundo, de los cuales, el 33% no se gestiona con las debidas garantías de protección medioambiental (Mena Roa, 2022). El promedio de los residuos generados por persona/día es de 0,74kg, pero puede oscilar entre 0,11 y 4,54kg. En general, existe una correlación directa entre la generación de residuos y el nivel de ingresos (Kaza et al., 2018). De este modo, la generación de residuos per cápita suele aumentar a mayores niveles de ingresos y tiende a disminuir a niveles de ingresos per cápita más bajos (figura 6). En esta última situación se encuentran varios países pertenecientes a las regiones de Medio Oriente, el Norte de África y la África subsahariana donde se concentra la mayor cantidad de campos de refugiados y desplazados.

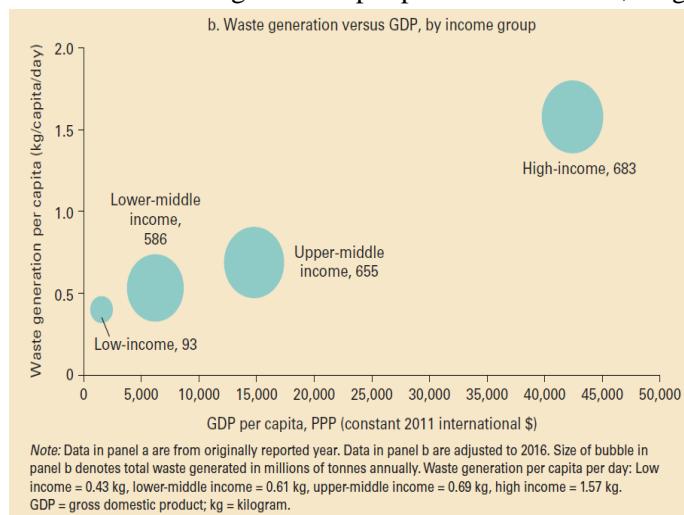


Figura 6. Relación entre la generación de residuos y el PIB (Kaza et al., 2018)

Sin embargo, la gestión de los residuos suele tener un coste elevado para muchos de los gobiernos locales de países de medianos y bajos ingresos, compitiendo con la financiación de otras prioridades como el acceso a agua potable, la atención sanitaria o la educación. Además, la gestión de los residuos suele estar a cargo de autoridades locales con recursos limitados o inexistentes y con una escasa capacidad de planificación, de gestión de contratos y de sistemas de control para el seguimiento operativo y logístico. Esto se ve reflejado principalmente en la recogida de residuos, la cual también varía de acuerdo con los niveles de ingreso de los países. Así, mientras en países de ingresos medios-altos la recogida es prácticamente universal, esta proporción desciende drásticamente hasta el 26% en zonas peri-urbanas y rurales de países con bajos ingresos (Vinti & Vaccari, 2022).

Respecto a la composición de los residuos, también persisten diferencias de acuerdo los niveles de ingreso de los países. Los países de ingreso alto generan menos residuos procedentes de alimentos y residuos verdes, un 32% del total; sin embargo, generan más residuos secos que podrían reciclarse como el plástico, el papel, el cartón y el vidrio. En contraposición, los países de bajos ingresos generan un 56% de residuos alimentarios y verdes (Kaza et al., 2018), es decir, la fracción de residuos orgánicos aumenta a medida que disminuye el nivel de desarrollo económico.

2.5 Riesgos derivados de la ausencia de gestión de residuos sólidos en campos de refugiados

Cuando se construyen e instalan campos de refugiados en situaciones de emergencia, la gestión de residuos tiende a tener una baja prioridad debido a la necesidad de cobertura inmediata de las necesidades básicas de las personas. Aunque el ACNUR está poniendo en marcha planes de gestión de residuos en algunos campos de refugiados emblemáticos como el campo de Kutupalong de Cox's Bazar en Bangladés (ACNUR, 2021) y el campo de Dadaab en Kenia (ICRC, 2018), aún persisten grandes desafíos asociados con la gestión de la basura, las malas prácticas de defecación al aire libre y la congestión de los sistemas de drenaje que muchas veces generan inundaciones y la dispersión de los desechos y contaminantes hasta los hogares (Uddin et al., 2022), incluso en períodos posteriores relacionados con la fase de recuperación temprana de los medios de vida y la seguridad alimentaria de las comunidades.

La ausencia de estrategias locales y planes de apoyo para la gestión de residuos, sumado a las condiciones de hacinamiento de los hogares, también propicia que las personas recurran a la eliminación de los residuos mediante enterramiento y acciones de quema incontrolada (Regattieri et al., 2015) que, a menudo, se llevan a cabo en la misma área habitable de los campos o en la periferia. Asimismo, las acciones de vertido y depósito de residuos en vertederos a cielo abierto, ocasiona riesgos medioambientales importantes relacionados con la dispersión de la basura por acción del viento, y la contaminación del suelo y los acuíferos a través de lixiviados. A su vez, los lixiviados pueden acumularse sobre otras fracciones orgánicas generando malos olores y, depositarse en residuos inorgánicos como botellas, latas y neumáticos creando vías para que animales como roedores, moscas y mosquitos puedan actuar como vectores infecciosos contagiando enfermedades como la malaria, el dengue, la fiebre amarilla, etc. (OXFAM, 2008).

2.6 Jerarquía de residuos

La jerarquía de gestión de residuos se basa en prevenir su generación. Sin embargo, para que esta jerarquía sea efectiva se debe adoptar un enfoque que tenga en cuenta las circunstancias específicas y los recursos disponibles en un campo de refugiados que, en general, son bastante limitados. Si bien la Directiva Marco de residuos de la UE 2008 (EUR-Lex, 2022) refuerza la idea transversal de que los

mecanismos de prevención son la opción más favorable para reducir los residuos por medio del diseño y cambiando los hábitos y el actual modelo de consumo para mitigar los impactos adversos en el medio ambiente y la salud humana, este primer eslabón de la jerarquía (prevención) no siempre es fácil de conseguir. En una situación de emergencia, también se requiere de la adopción de un conjunto de medidas que eliminen primero los riesgos inmediatos a la seguridad y la salud humana. En ese sentido, desde el 2008, la ONG Oxfam ya analizaba la importancia de la gestión eficaz de los residuos sólidos en situaciones de emergencia desde el punto de vista de la salud y el medio ambiente con un enfoque jerárquico muy similar a la Directiva Marco de residuos de la UE como se ilustra en la figura 7.



Figura 7. Jerarquía de residuos en contextos humanitarios (izquierda) y su comparación con el enfoque jerárquico de residuos de acuerdo con la Directiva Marco de residuos de la UE (derecha) (OXFAM, 2008) y (EU, 2022).

En el campo del desarrollo de soluciones climáticamente inteligentes para la generación de biogás, el uso de residuos orgánicos es una práctica común, ya que, como se mencionó en la sección 2.4, la fracción orgánica (FO) compuesta principalmente por residuos alimentarios y vegetales, es la más abundante en este tipo de contextos. De esta manera, y en lo que concierne a la producción de biogás mediante un pequeño biodigestor a escala doméstica, este trabajo hará referencia al uso de dos tipos de sustratos orgánicos (FO) recomendados por la FAO (Varnero, 2011), a saber: estiércol animal y residuos domésticos.

2.7 Rol de la economía circular en la generación de biogás

El papel del biogás, y del biometano, es fundamental para la circularidad de los recursos biológicos. En efecto, desarrollar una economía circular significa cerrar los ciclos para reducir la cantidad de recursos naturales extraídos, los desechos depositados en vertederos y los GEI emitidos a la atmósfera. Los procesos biológicos que acompañan la producción de biogás como opción para evitar las acciones de vertido e incineración se convierten, entonces, en una alternativa sostenible para devolver y reintegrar los recursos y nutrientes como el N, P y K al medio ambiente, así como para reducir la producción de GEI ya que esta tecnología evita que el CO₂ y el CH₄ se volatilicen, empleándolos para obtener energía. La figura 8 evidencia la importancia de la producción y uso de biogás como una parte central de los ciclos biológicos de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2023), especialmente en lo que concierne a la generación de calor y electricidad.

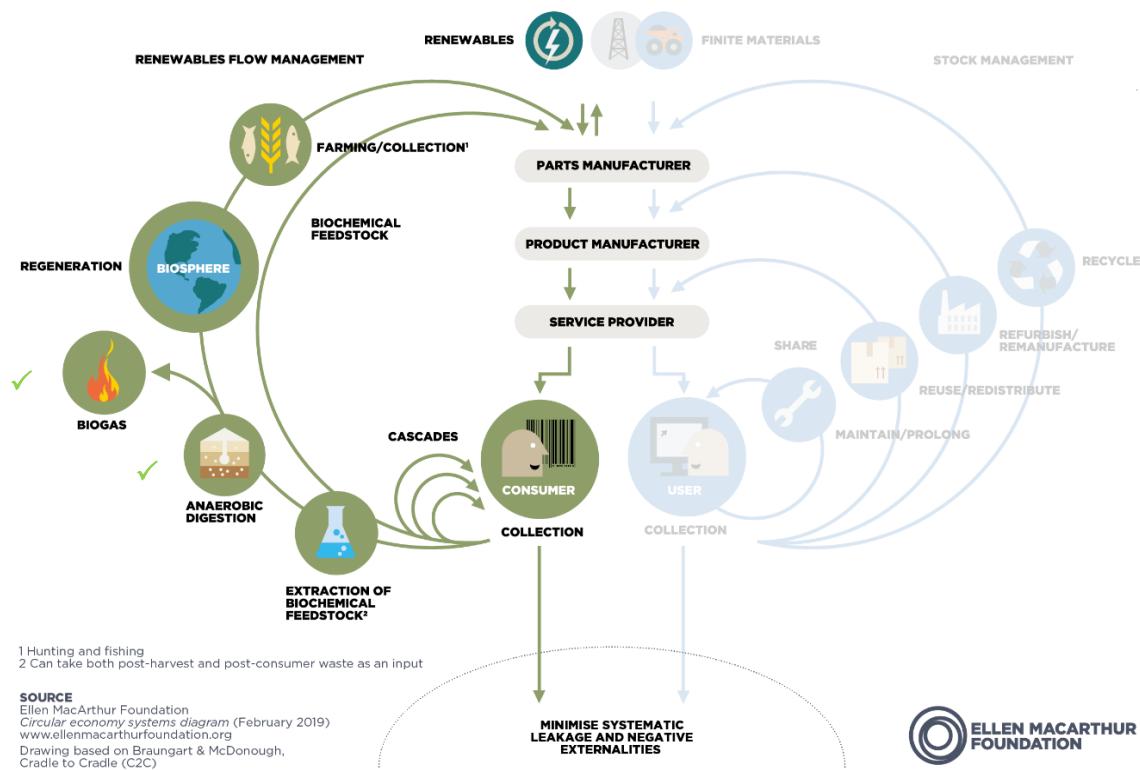


Figura 8. Representación del ciclo biológico dentro del diagrama de mariposa de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2023)

La producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica para su uso como combustible domiciliario en la cocción limpia de alimentos presenta diversas ventajas en cuanto al ahorro de los costes medioambientales relacionados a la gestión de residuos y de energía (MITECO, 2022), puesto que el biogás puede utilizarse como fuente de energía renovable alternativa al gas natural. Además, como se puede apreciar en la figura 8, si bien es cierto que la digestión anaeróbica produce biogás, paralelamente, también genera un residuo en forma de subproducto llamado “digestato” con un alto potencial de restauración del suelo. Este digestato que actúa como biofertilizante, puede aplicarse directamente a la tierra, compostarse o utilizarse como enmienda al suelo para favorecer procesos de agricultura regenerativa (EBA, 2018). Esta fase de recuperación de energía y subproductos es parte del uso en “cascada” de los recursos, característico de la economía circular. Se estima que, como resultado de un sistema alimentario circular donde se recircula la materia orgánica para su aprovechamiento en la cocción limpia, se podría alcanzar una reducción de 4,4Gt anuales de emisiones de GEI (Wang et al., 2022).

2.8 Circularidad en el ámbito humanitario y su contribución a la biosfera

La promoción de estrategias de desarrollo con un enfoque mixto en la sostenibilidad financiera y medioambiental se está volviendo crucial para las maniobras operativas de los campos de refugiados y desplazados. La Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC) ha comenzado a trabajar con un plan llamado “Green response” que pretende mejorar la sostenibilidad medioambiental de la respuesta humanitaria promoviendo prácticas basadas en la economía circular (IFRC, 2021). Por otro lado, en cuanto a la sostenibilidad económica, la necesidad de atraer fondos privados y más consistentes se está tornando fundamental, ya que la mayor parte de la financiación proviene de organismos públicos y ONGs que operan en los territorios afectados por los

conflictos y las crisis. A modo de ejemplo, solo en el campo de refugiados de Zaatari en Jordania, el coste operativo para garantizar la provisión de alimentos y agua potable bordea los 500.000 dólares (\$USA) por día. De ahí la importancia de promover estrategias de desarrollo alternativo basadas en créditos de carbono dentro del mercado de Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (ETS, por sus siglas en inglés) (Manni et al., 2018).

Consciente de los retos de que supone la mitigación del cambio climático y los efectos que tiene la degradación del medio ambiente en la vida de las personas refugiadas y sus comunidades de acogida, el ACNUR ha desarrollado una Estrategia operativa trienal (2022-2025) para la resiliencia climática y la sostenibilidad medioambiental que promueve la rehabilitación de los entornos naturales de los campos de refugiados y desplazados, así como la minimización de la huella ecológica de la asistencia humanitaria (UNHCR, 2022a). Esta estrategia reconoce la necesidad de focalizar la respuesta humanitaria en los siguientes aspectos:

- **Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y circularidad de los productos.** La gestión de calidad de los productos relacionados con los *artículos básicos de ayuda o de primera necesidad* como mantas, juegos de cocina, luces solares, mosquiteras, etc., entregados en contextos humanitarios, no solo implican las fases adquisición y distribución para su entrega a las personas, sino también la fase de uso y calidad de los productos desde el punto de vista de su ciclo de vida y durabilidad.
- **Circularidad en la gestión de los residuos.** La sostenibilidad de la acción humanitaria tiene por objetivo generar el mínimo impacto medioambiental posible durante la intervención y mejorar los mecanismos de resiliencia de la comunidad refugiada y de acogida ante los riesgos relacionados con el cambio climático. Por ello, más allá de los impactos cuantificables en cuanto a las emisiones de GEI y de residuos que pueden generarse durante la cadena de suministro (a saber: producción, transporte y distribución artículos de primera necesidad), también se trata de minimizar los residuos generados por el uso y disposición de los artículos una vez acaba su vida útil mediante operaciones de reciclaje, reparación, reutilización, devolución o eliminación segura de los artículos o bienes descartados por parte de la comunidad y de los actores humanitarios evaluando opciones de gestión y tratamiento a nivel local.
- **Cocina limpia y reforestación.** La estrategia trienal refuerza la importancia de la cocina limpia y la reforestación con el objetivo de mitigar los impactos negativos en el medio ambiente y mejorar la respuesta de protección a las personas refugiadas y las comunidades de acogida en consonancia con lo mencionado en las secciones 2.1 y 2.3. Los últimos datos proporcionados por el ACNUR estiman que cada año se talan entre 20 y 25 millones de toneladas de árboles en los campos de refugiados y desplazados o alrededor de ellos, y que el 90% de las acciones de deforestación son debidas a las necesidades apremiantes de contar con combustible para cocinar (UNHCR, 2023b). Para ello, y de cara a la sostenibilidad y protección de las personas refugiadas y desplazadas, se encuentra disponible un Fondo de Protección Ambiental (REP, por sus siglas en inglés) que permitirá invertir en programas de reforestación y cocina limpia generando “créditos de carbono” verificados a gran escala por las mismas personas refugiadas. La venta de los créditos de carbono permitirá alimentar este fondo y reinvertir a su vez en nuevos programas de reforestación y cocina limpia que mejorará continuamente los medios de vida de las comunidades, impulsando, a su vez, la generación de empleo.
- **Resultados globales.** Las acciones de resiliencia climática y sostenibilidad medioambiental relacionadas con la circularidad en la gestión de los residuos, la cocina limpia y la reforestación deben contar con indicadores de resultados relacionados con la respuesta, el suministro y la entrega de la ayuda humanitaria para monitorear y cumplir con la implementación de la estrategia. Algunos de estos indicadores trazados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados esperados para algunos indicadores empleados para monitorizar la producción de emisiones de GEI y residuos sólidos durante las operaciones de respuesta, suministro y entrega de la ayuda humanitaria en los campos de refugiados y las comunidades de acogida.

Respuesta y entrega	Indicadores y metas
	Reducción global de 172.000 toneladas de emisiones de CO ₂ mediante la mejora de las respuestas humanitarias.
	10 campos de refugiados beneficiados de la mejora de los sistemas de gestión de residuos sólidos.
	30% de las personas refugiadas con acceso a una cocina limpia.
	Proyectos para generar 1 millón de toneladas de compensación de emisiones de CO ₂ a través de programas de reforestación y cocina limpia establecidos en tres países.
Suministro y entrega	Indicadores y metas
	Incremento en un 20% de los contenidos ambientalmente sostenibles (reciclados, reciclables o de origen sostenible) de los artículos básicos de ayuda o de primera necesidad
	Reducción en un 20% de la proporción de plástico en los envases de los artículos básicos de ayuda
	Reducción en un 20% de las emisiones totales de GEI derivadas de la producción y entrega de los principales artículos básicos de ayuda y de otros artículos estándar de asistencia a personas refugiadas y desplazadas.
	70 operaciones en el país dirigidas a suministrar servicios de gestión de residuos (cargas completas, reciclaje, reutilización, eliminación segura).
	Reducción en un 10% de las emisiones de CO ₂ del transporte internacional de mercancías

2.9 Digestión anaeróbica para la producción de biogás

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico en ausencia de oxígeno que permite la transformación de la materia orgánica en una mezcla de gases entre los que de forma mayoritaria se encuentran el CH₄ y el CO₂ con pequeñas cantidades de ácido sulfúrico, amoniaco, hidrógeno y vapor de agua. La generación de CH₄ es un proceso natural que tiene lugar en zonas de sedimentos lacustres y humedales, pero también en zonas de vertido donde existe una importante presencia de residuos orgánicos (Vasco-Correa et al., 2018) y que puede utilizarse en condiciones controladas para producir biogás mediante un reactor hermético llamado biodigestor (o biorreactor) que proporciona las condiciones adecuadas para que los microorganismos transformen la materia orgánica en biogás y en un residuo sólido-líquido denominado digestato (Mutz et al., 2017) que, como se mencionó en la sección 2.7, puede ser utilizado como biofertilizante.

El proceso de generación de biogás puede resumirse en cuatro fases principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (figura 9). Durante la hidrolisis, los polímeros más grandes y complejos se descomponen en monómeros solubles; en la acidogénesis las moléculas sencillas rinden ácidos grasos

volátiles (AGV). En la fase de acetogénesis los monómeros y AGV se convierten en sustratos que las bacterias metanogénicas pueden metabolizar para su transformación final en CH₄ y CO₂ durante la fase de metanogénesis (MAPA, 2010). Para que todo el proceso se lleve a cabo de forma eficiente y optimizar la obtención de CH₄, se debe alcanzar un **equilibrio** entre la velocidad de generación de AGV (hidrólisis y acidogénesis) y su utilización (acetogénesis y metanogénesis).

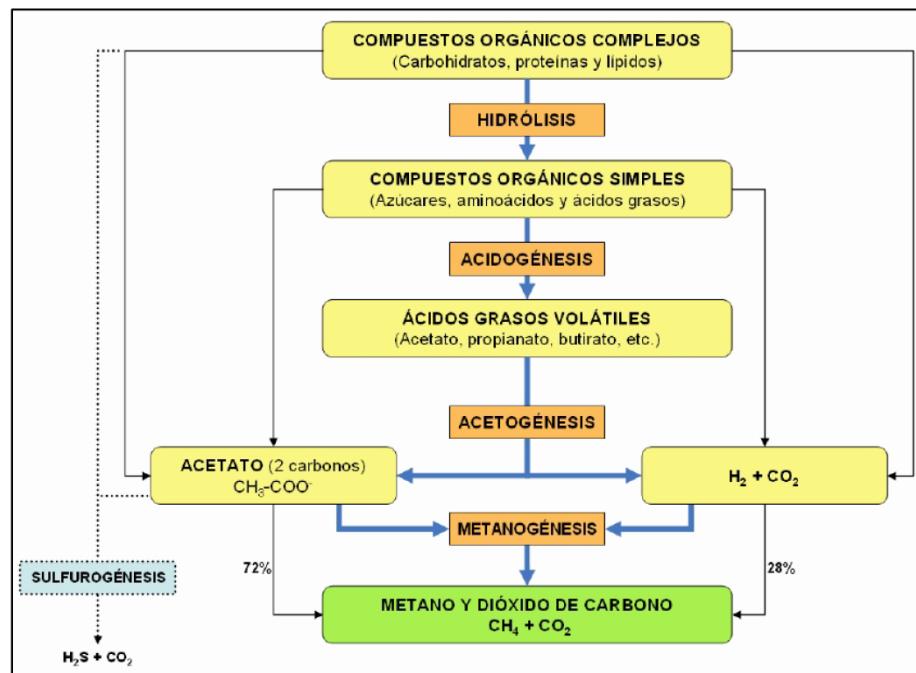


Figura 9. Fases de la digestión anaeróbica (MAPA, 2010)

El biogás resultante de la digestión anaeróbica puede depurarse con el objetivo de eliminar el CO₂ y otros gases obteniéndose así el “biometano”, que tiene una riqueza en CH₄ superior al 95%. Tanto el biogás como el biometano pueden aprovecharse para producir energía eléctrica o térmica debido al potencial energético del CH₄. La concentración CH₄ en el biogás obtenido puede variar en función del sustrato utilizado y las condiciones operativas empleadas, oscilando entre el 55% y el 75% y con un contenido energético de 6,0 a 6,5 kWh/m³ (Tilley et al., 2014), equivalente a medio litro de gasóleo o 5,5 kg de leña, mientras que la concentración de CO₂ suele estar entre 30% y el 40%. Del mismo modo, dependiendo del sustrato que se utilice, se generará una cantidad diferente de biogás. Por ejemplo, 1 kg de estiércol animal genera aproximadamente 100L de biogás, mientras que 1kg de excretas humanas produce 50L (Trinh & Wieselblad, 2018). No obstante, la producción de biogás variará en función del tipo de sustrato animal, puesto que si se trata de estiércol de porcino habrá más capacidad de producción de biogás y metano, que si procede de vacas u ovejas, que ya tienen una "digestión anaerobia" o ruminal.

2.9.1 Parámetros ambientales y operacionales

El factor más importante para el proceso de digestión anaeróbica es la tasa de crecimiento de microorganismos. Para aumentar la eficiencia y la estabilidad de la producción de biogás, se puede mejorar la actividad microbiana controlando los parámetros de funcionamiento del biodigestor, asegurando que se mantienen una serie de condiciones ambientales y que se cumplen una serie de condiciones de trabajo de los reactores; las primeras se controlan con parámetros ambientales y las segundas con parámetros operacionales. Entre los primeros los más importantes son:

- **pH.** Debe mantenerse en intervalos neutros. Los valores óptimos oscilan entre 6,5-7,5, aunque este intervalo varía durante las primeras fases de la digestión anaeróbica.
- **Alcalinidad.** Se debe asegurar la capacidad tamponante y evitar la acidificación del “licor mezcla” dentro del digestor.
- **Relación C:N.** La relación de carbono y nitrógeno es un parámetro esencial para el crecimiento microbiano, puesto que son los principales nutrientes de las bacterias. El consumo de carbono suele ser unas 30 veces mayor que el de nitrógeno, por lo que la relación optima recomendada para ambos elementos en el sustrato inoculado va de 30:1 hasta 20:1 (Varnero, 2011).
- **Potencial redox**
- **Concentración de inhibidores**

Por otro lado, entre los principales parámetros operacionales se encuentran:

- **Temperatura.** La tasa de crecimiento y reproducción microbiana es más rápida a temperaturas más altas. En la mayor parte de los casos, un intervalo de temperatura mesófilo, entre 35-48°C, se considera el más estable. Procesos a temperaturas más elevadas dentro del intervalo termófilo, es decir, sobre 50°C, pueden eliminar patógenos y ayudar a reducir los volúmenes del biodigestor, pero supone un mayor coste energético y también incrementar la sensibilidad a algunos inhibidores como el amoniaco (Campos Pozuelo, 2001). A temperaturas psicrófilas, inferiores a 15°C, la tasa de conversión de materia orgánica en biogás tiende a reducirse significativamente.
- **Tiempo de retención (Trh) o tiempo medio de permanencia del influente o sustrato en el reactor.** Es el cociente entre el volumen y el caudal ($Trh=V/Q$), y varía en función de las características de sustrato, de otros factores como la temperatura de operación, el tipo de reactor y el objetivo de producción de biogás establecido. En general, en los casos de tecnologías de bajo coste, el Trh de la materia orgánica en el biodigestor suele ser de 15 días en climas cálidos y de 25 días en climas templados dependiendo del tipo de reactor y del sustrato que se utilice (SSWM, 2018).
- **Tasa de carga de orgánica (OLR):** La tasa de carga orgánica cuantifica la cantidad de materia orgánica o sustrato que un biodigestor puede degradar por unidad de volumen y tiempo. La ORL varía en cada sistema. Así, la OLR apropiada para cada digestor dependerá del tipo de sustrato orgánico utilizado, ya que este determina el nivel de actividad bioquímica que ocurre dentro del biodigestor. Valores bajos de OLR implican elevados Trh y/o baja concentración de sólidos volátiles (SV) en el influente. Por otro lado, cuando se incrementa la OLR esto podría conllevar a una reducción en la producción de biogás por unidad de SV introducida afectando el rendimiento del proceso por una sobrecarga debido a mayores concentraciones de ácidos grasos volátiles, que pueden inhibir la actividad microbiana por acidificación al interior del biodigestor (Paritosh et al., 2017). Aunque se han realizado experimentos donde la tasa de producción volumétrica de biogás aumentaba de 2,7 a 6,6 L/L/d a mayores velocidades de carga orgánica (de 3,7 a 9,2 kg sólidos volátiles m³/día) sin alterar el proceso, para lograr una digestión más controlada en contextos de países en vías de desarrollo, se recomiendan tasas de carga orgánica entre 0,5 y 2 kg SV m³/día (Paritosh et al., 2017) y 2 kg SV m³/día (Vögeli et al., 2014). En cualquier caso, la OLR óptima debería determinarse para cada instalación y sustrato a utilizar, en orden a optimizar la operación técnica y económica del biodigestor.

2.9.2 Sustratos y rendimiento del biogás

La idoneidad de los sustratos utilizados para la producción de biogás está determinada por su composición bioquímica y nutricional primaria (figura 7). Los requerimientos nutricionales demandados

por los microorganismos no suelen satisfacerse solo mediante la digestión de sustratos individuales, sino que la combinación de dos o más sustratos o co-digestión puede proporcionar una ratio adecuada de C:N y micronutrientes. La puesta en marcha de un biodigestor requiere de un sustrato inicial enriquecido con microrganismos adaptados al mismo para estimular el proceso anaeróbico. Los sustratos más apropiados para la inoculación inicial son los purines, el estiércol animal (Vögeli et al., 2014) y los lodos provenientes de las aguas residuales (Tshemese et al., 2023). Para evaluar la eficiencia de la actividad microbiana en la producción de CH₄, se puede determinar el potencial bioquímico del metano (PBM) expresado en m³ de CH₄ por kg de SV adicionado al biodigestor. Este parámetro es importante en cuanto a la elección del sustrato, puesto que la biodegradabilidad de un sustrato está directamente relacionada con el rendimiento del CH₄, es decir, con el porcentaje de sólidos que se adicionan o fermentan durante la digestión anaeróbica (Sánchez-Reyes et al., 2016). Sin embargo, no todos los sustratos aptos para la degradación bacteriana se digieren realmente tras su paso por el digestor, por lo tanto, es importante considerar las limitaciones técnicas y operativas de una instalación de biodigestión. La tabla 3 muestra algunos ejemplos de tipos de sustrato con los parámetros más relevantes para la producción de biogás (Huber, 2019).

Tabla 3. Características de algunos sustratos típicos para biodigestores de países en vías de desarrollo (Huber, 2019)

Tipo de sustrato	SV/ST [%]	Relación C/N	Rendimiento del metano [m³/ Kg sv]
Patatas	85-96	44	0.3-0.9
Estiércol de vaca	68-85	14-40	0.1-0.8
Maíz (cultivo entero, fresco)	41-50	42-51	0.27-0.29
OFMSW	43-95	16-39	0.06-0.58

OMFSW: Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Por otro lado, las características y composición de estos sustratos varían según la región geográfica, la densidad de la población, la estación del año y las condiciones socioeconómicas. Asimismo, la calidad del sustrato dependerá en gran medida del sistema de recolección y recogida de los residuos, y que estos no estén contaminados con material inorgánico. Diversos estudios señalan que la segregación de residuos en origen aumenta la calidad del sustrato y reduce la necesidad de clasificación, infraestructura y recursos humanos una vez que los que residuos llegan al biodigestor (DEFRA, 2011). No obstante, en países de medianos y bajos ingresos la recogida selectiva de residuos no es una práctica habitual, ya que los residuos orgánicos suelen estar mezclados con diversos materiales de desecho y que requiere inevitablemente una clasificación posterior de la FO para facilitar el proceso de digestión anaeróbica incrementando los costes y generando un sustrato de menor calidad (Vögeli et al., 2014).

Con el fin de mejorar el proceso de producción de biogás se han desarrollado diversas técnicas de pretratamiento del sustrato como el pretratamiento biológico, químico y térmico (Kang et al., 2017), siendo el físico o mecánico el más común en países de medianos y bajos ingresos. Este pretratamiento consiste en la clasificación de los residuos mediante tamizado, la reducción del tamaño de las partículas de la FO mediante el triturado con un diámetro máximo recomendado de 5cm y la adición de agua antes que la mezcla se alimente al biodigestor (Vögeli et al., 2014). En el caso de los residuos inorgánicos o no biodegradables como metales, plástico y vidrio, la clasificación manual puede ir acompañada de una separación magnética para los restos de metales (Fachverband Biogas e. V, 2019).

El pretratamiento biológico también se perfila como opción viable debido a su bajo coste y a su aplicabilidad a pequeña escala. Por ejemplo, el pretratamiento con compost maduro para la digestión anaerobia de residuos orgánicos municipales puede incrementar la eliminación del carbono orgánico disuelto, mejorando la producción de CH₄ (Kang et al., 2017). Del mismo modo, procesos de pretratamiento térmico o hidrólisis térmica (THP) utilizando pretratamiento termófilo y mesófilo para sólidos provenientes de aguas residuales como lodos primarios (PS, por sus siglas en inglés) y lodos residuales activos (WAS, por sus siglas en inglés), han dado como resultado un aumento en el rendimiento de CH₄ y un aumento en la eliminación de los SV de entre un 30% y 45% de acuerdo con el Trh del biodigestor. En figura 10 se muestran las curvas de rendimiento CH₄ en función del Trh y la alimentación con PS y WAS pretratados (Batstone et al., 2011), en la que se puede observar como el pretratamiento tiene un impacto sustancial en el rendimiento de biogás.

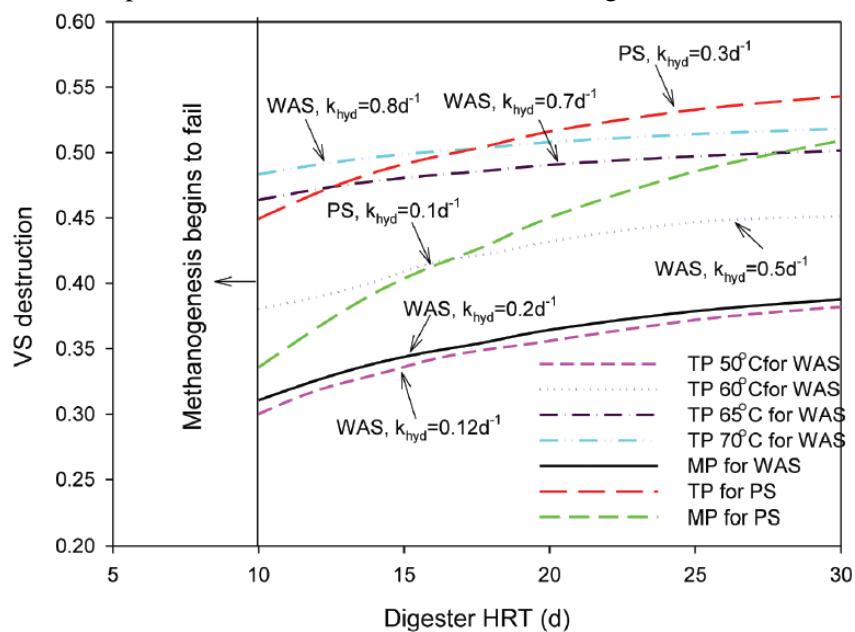


Figura 10. Curvas de rendimiento CH₄ en función del TRH y el pretratamiento de lodos primarios (PS) y lodos residuales activos (WAS) (Batstone et al., 2011)

2.9.3 Tecnologías de biodigestores domésticos y comunitarios

El interés por las tecnologías de producción de biogás a pequeña escala ha aumentado en los últimos años en África, Asia y América Latina, especialmente en zona rurales (IRENA, 2016). Varios países como India, China, Bangladés, Camboya, Vietnam, Kenia, Ruanda y Tanzania están promoviendo campañas masivas para incrementar su uso (Regattieri et al., 2018). La propagación masiva de estas tecnologías ha sido posible mediante los programas de apoyo de ONGs, de los gobiernos locales y del compromiso político al largo plazo. Europa lidera suministro de biogás con más del 50% del suministro mundial, seguido por Asia con un 31% y América con el 14% (Pilloni et al., 2021). Es difícil encontrar una cuantificación precisa de la contribución de biogás de los biodigestores domésticos a la producción nacional total de energías renovables, no obstante, se estima que, en China, 43 millones de instalaciones de biodigestores domésticos junto a plantas de biogás a gran escala generan aproximadamente 15.000 millones m³ de biogás, equivalente a 9.000 millones m³ de biometano. Por otro lado, Nepal cuenta con uno de los programas de biogás más exitosos del mundo con más de 330.000 biodigestores domésticos que proporcionan combustible limpio para cocinar (Scarlat et al., 2018).

El diseño de biodigestores para la producción de biogás en contextos humanitarios y en países en vías de desarrollo puede variar en función de factores como el espacio, las condiciones climáticas de la zona, las características del suelo, el volumen de la FO generada, el acceso a fuentes de agua y los recursos materiales, financieros y humanos disponibles. Los biodigestores suelen instalarse por encima o por debajo del suelo en forma de tanques prefabricados o cúpulas construidas con materiales locales (Trinh & Wieselblad, 2018). Los principales modelos de biodigestores instalados en contextos humanitarios son: (a) cúpula fija (modelo chino), (b) de tambor flotante (modelo indio) y (c) tubular o de balón, como se ilustra en figura 11. Aunque el diseño y el método de obtención de biogás es diferentes en cada caso, el proceso de digestión anaeróbica sigue siendo el mismo.

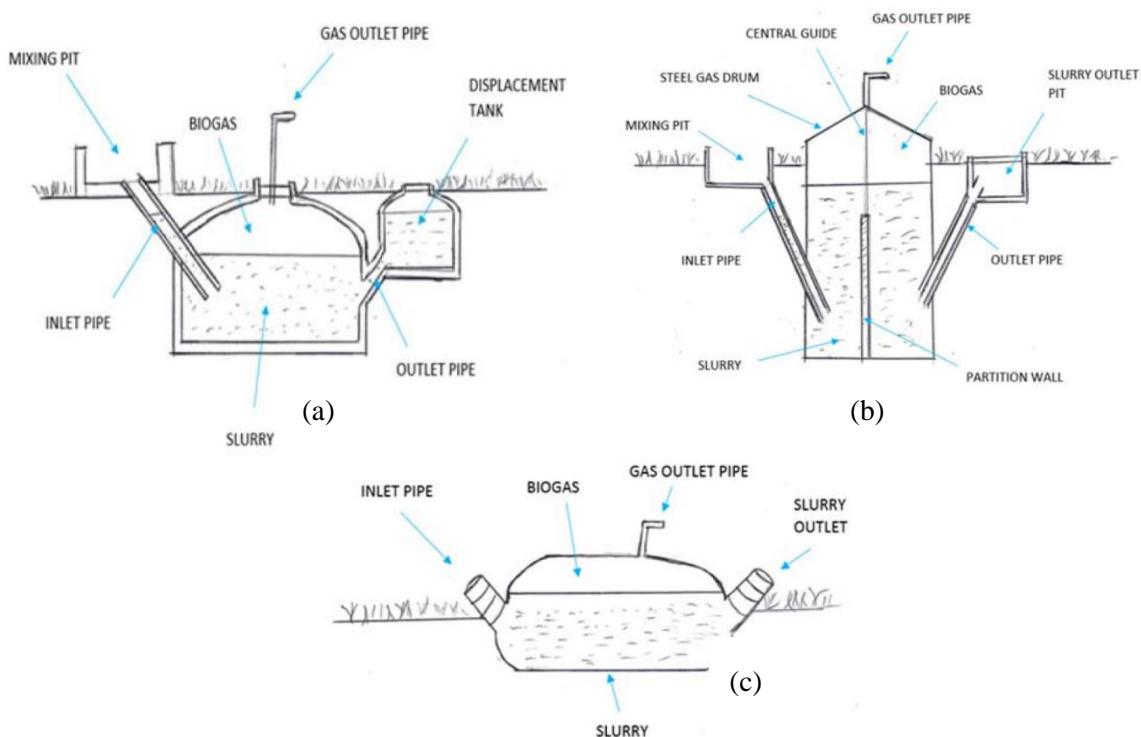


Figura 11. Principales modelos de biodigestores usados en países en vías de desarrollo y PMA (IRENA, 2016)

Históricamente, estos sistemas de biodigestión domésticos se han adaptado bien al sector humanitario porque son de bajo coste y sencillos de manejar y mantener. En general, son sistemas que no disponen de instrumentos de control y monitoreo y que funcionan a temperatura ambiente. Tanto el biodigestor tubular como el de tambor flotante son fáciles de construir, mientras que el de cúpula fija requiere un cierto nivel de conocimiento técnico. En términos generales, este biodigestor funciona como una planta autónoma local, bastante compacta por el tipo de material, pero con costes elevados de reparación en caso de fugas (Regattieri et al., 2018). El tamaño de los biodigestores de tambor flotante oscila entre 1 a 50 m³ y los biodigestores de cúpula fija entre 6 a 16 m³ (Trinh & Wieselblad, 2018). La figura 12 (a) y 12 (b) muestra un ejemplo de biodigestor de cúpula fija construido en campos de refugiados a base de ladrillo y hormigón en la que el sustrato se introduce por un lateral y el biogás se recoge a través de una tubería situada en la parte superior de la cúpula. A medida que se produce biogás, el digestato sale del digestor mediante una tubería de salida a un depósito de desplazamiento.

El biodigestor de tambor flotante es un digestor parcialmente enterrado con un soporte de gas móvil. El biogás se recoge en el tambor de gas superior que se mueve hacia arriba y hacia abajo en función del gas producido. El tambor suele ser de acero, aunque algunos diseños también utilizan plástico reforzado con fibra de vidrio (IRENA, 2016). Aunque el nivel de producción de biogás se puede monitorear de acuerdo al nivel visible del tambor, también puede presentar fugas y barreras de mantenimiento.

Por el contrario, el biodigestor tubular, al estar conformado por un único tanque o bolsa, generalmente fabricado en polietileno, es un sistema móvil y que facilita su transporte. Para evitar daños en el sistema, este biodigestor suele instalarse en una zanja, ligeramente más profunda en la salida del sistema para la extracción del digestato. A medida que se produce biogás, la parte superior de la bolsa se infla y el biogás puede extraerse a través de la tubería de salida en la parte superior de la bolsa. En orden a favorecer la salida del biogás, la presión puede aumentarse colocando pesos en la parte superior (IRENA, 2016) como se muestra en la figura 12 (c).



Figura 12. Biodigestor de cúpula fija (a) Campo de refugiados de Cox's Bazar en Bangladés (Kurkowska et al., 2019), (b) Campo de refugiados de Mpaka, Suazilandia (Presidian Editor, 2015), (c) Biodigestor tubular en Kenia región de Meru, Nyeri, Kericho (GIZ & EnDev, 2022)

En cuanto a la vida útil de los biodigestores, el de cúpula fija suele tener una vida de 10 a 20 años y para el biodigestor de tambor flotante se estima en 3 a 12 años, dependiendo de las condiciones climáticas de la zona (Trinh & Wieselblad, 2018). En el caso del digestor el tubular, la vida útil varía según la resistencia del material, siendo de 5 años para construcciones en PVC y de 25 años para el HDPE (EnDev, 2022). Cada una de estas soluciones proveen aproximadamente $0,5 \text{ m}^3$ de biogás por cada m^3 de biodigestor (Ortiz et al., 2019).

Por último, es importante señalar que, en algunos países de Centroamérica y el Caribe con altos niveles de desplazamiento interno, particularmente en Haití (OIM, 2022), también es habitual el uso de biodigestores domésticos construidos con materiales locales reciclados de bajo coste como el PVC, el caucho butílico y tuberías neumáticas (Cherenfant & Tech, 2022), que incluso han permitido realizar prototipos experimentales y desarrollar sistemas de “sensorización” para simular la productividad y calidad del biogás en este tipo de entornos (Regattieri et al., 2018) como se muestra en la figura 13.



Figura 13. Biodigestor doméstico en tambor de PVC, Haití (Cherenfant & Tech, 2022) y Prototipo experimental con sistema de sensorización (Regattieri et al., 2018)

2.9.4 Implementación de sistemas de biodigestión en contextos humanitarios

El ACNUR, junto a algunos socios humanitarios como OXFAM, El Comité Internacional de la Cruz Roja (ICRC) (OXFAM, 2011), El Consejo Noruego para Refugiados NRC (NRC, 2014), La Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional GIZ y Acción contra el Hambre (ACF) (Eyrard et al., 2015), vienen impulsando desde la década de los 90 proyectos para la generación de biogás en contextos humanitarios basados en tecnologías de biodigestores a pequeña escala mencionados en el punto 2.9.3. Las primeras experiencias piloto datan de entre 1997 y 2001 en Nepal y Afganistán con el objetivo de dar respuesta a las necesidades energéticas y a los problemas medioambientales, de salud y saneamiento de las personas refugiadas y retornadas mediante la instalación de sistemas producción de biogás a nivel residencial y comunitario (UNHCR, 2002). El sistema contempla el diseño de un tanque de biodigestión de cúpula fija en el que se introduce la FO derivada del estiércol animal, la materia vegetal y las heces humanas desde bioletinas, sustratos todos ellos comunes en este tipo de contextos.

Como se ilustra en la figura 14, el biogás producido por descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas se canaliza para cocinar e iluminar el hogar, mientras el lodo residual o digestato puede utilizarse como fertilizante en zonas de cultivos colindantes a las viviendas de las comunidades.

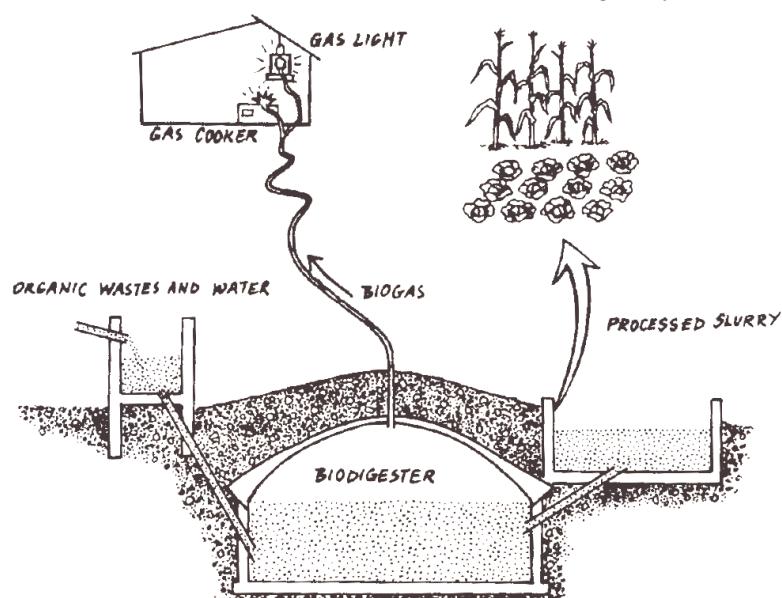


Figura 14. Sistema de producción de biogás en contextos humanitarios (UNHCR, 2002)

Actualmente, el diseño del proceso del sistema anaeróbico propuesto por el sector humanitario sigue siendo el mismo. La figura 15 muestra el resultado de la puesta en marcha de un proyecto piloto liderado por la ONG OXFAM para la producción de biogás compartido por 13 hogares en el asentamiento de refugiados en Nakivale, Uganda, dirigido principalmente a satisfacer las necesidades energéticas de personas con necesidades especiales y familias encabezadas por mujeres y ancianos/as en el marco del fortalecimiento de la resiliencia mediante la mejora de las capacidades locales de gestión de riesgo de desastres (OXFAM, 2019).



Figura 15. Mujer cocinando con biogás. Asentamiento de refugiados en Nakivale, Uganda (OXFAM, 2019)

No obstante, desde el 2021, el ACNUR está dando prioridad a sistemas prefabricados de biodigestión (Cheng et al., 2014) elaborados con materiales compuestos y reciclables (Barak, 2021) mediante un diseño mejorado de los digestores tubulares o de bolsa, ampliamente utilizado en zonas rurales de Sudamérica, Centroamérica y Asia Pacifico (Pilloni et al., 2021), puesto que implican nuevos procesos y técnicas de producción de biogás con un ahorro significativo en costes. Estas soluciones basadas en la economía circular para la promoción de la cocina limpia (CCA, 2021) pretenden abastecer de biogás a los campos de refugiados en diversos países africanos.

Un ejemplo a nivel piloto de la aplicación de estos nuevos sistemas de biodigestión se realizó en el campo de refugiados de Dzaleka (Malawi), donde se instalaron nueve biodigestores que proporcionan, tanto a los hogares como a un restaurante administrado por la propia comunidad refugiada, combustible limpio para cocinar. El programa pretende beneficiar a 17.000 refugiados, solicitantes de asilo y miembros de las comunidades de acogida cercanas. En esta misma línea, la figura 16 ilustra el desarrollo de un proyecto piloto de acceso a energía limpia en el campo de refugiados de Tongogara (Zimbabwe) en 2022 mediante nueve biodigestores conectados en serie y que pretende beneficiar en un futuro a 20.000 personas. Este proyecto se está llevando a cabo en consorcio con la empresa implementadora (HomeBiogas) y da solución a los problemas de construcción de los modelos de biodigestores fijos clásicos como el de cúpula fija y de tambor flotante, e incide de forma positiva en el ahorro económico para las familias debido al gasto en la compra de fertilizantes artificiales para los cultivos y en la reducción del impacto en la deforestación del entorno (Mavhunga, 2022b).

En promedio, la capacidad instalada en el campo de refugiados de Tongogara alcanza una producción de biogás de $2,5 \text{ m}^3$ de biogás/ m^3 digestor/día, además de una producción de 300L/día de bioabono para regar las zonas de cultivo, lo que iguala el rendimiento de los biodigestores tradicionales, con una vida útil de, al menos, 15 años. Además, este tipo de sistemas pueden instalarse y transportarse fácilmente, lo que lo hace muy apto para zonas remotas.



Figura 16. a) Funcionamiento biodigestor portátil HomeBiogas (HomeBiogas, 2023b), b) Sistema de producción de biogás en el campo de refugiados de Tongogara, Zimbabwe (Pinkerton, 2022)

3. Sostenibilidad del uso de biogás en la cocina limpia

Los sistemas de producción de biogás en los campos de refugiados y desplazados deben basarse siempre en un análisis participativo del contexto. Es fundamental que estas soluciones basadas en la naturaleza sean compatibles y adecuadas al contexto local para garantizar un funcionamiento sostenible a largo plazo. Para ello, y, aunque no es el propósito este trabajo, es altamente recomendable realizar un estudio de viabilidad antes de poner una marcha un proyecto o una instalación de biogás. Además, es necesario evaluar las condiciones de la financiación en este tipo de proyectos, puesto que muchas veces se emplean préstamos que deben considerar los periodos de amortización y el tipo de interés. En definitiva, es esencial tener en cuenta todos los factores que pueden influir en el proyecto, así como las formas en que una instalación de biogás puede sostenerse en el tiempo y generar beneficios socioeconómicos y ambientales.

3.1 Beneficios socioeconómicos

El uso de biogás en los campos de refugiados abarca una dimensión mucho más amplia que los beneficios medioambientales que puede otorgar este tipo de soluciones basadas en la naturaleza. La prosperidad y el bienestar humano también implican la confluencia de los beneficios que tienen el impacto del combustible limpio y renovable sobre la esfera social y económica de las poblaciones desplazadas por la fuerza. No resulta fácil cuantificar el impacto socioeconómico desde la literatura disponible relacionada con proyectos de biogás a pequeña escala, puesto que el impacto económico varía mucho en función del contexto y del tipo de proyecto. Sin embargo, existe evidencia de algunas experiencias desarrolladas en países de África, Oriente Medio y Asia Meridional donde se pueden extraer algunos datos de orden económico, así como de los beneficios socioculturales y de reducción de los conflictos entre las personas refugiadas y las comunidades de acogida al aminorar sustancialmente la competencia por el uso de leña como fuente de energía para cocinar, alumbrarse y calentarse (Cordaid, 2021). Del mismo modo, el uso de biogás, tiene como resultado una reducción del tiempo de trabajo y

de desgaste físico en la recolección de leña, aumentando la probabilidad de que las personas encargadas de esas tareas (en gran medida niños y niñas) asistan a la escuela, la posibilidad de generar ingresos adicionales y generar ahorros que pueden alcanzar los 1,2 dólares a la semana por hogar suministrando 3kg de FO/día para la producción de biogás en contextos urbanos, como se ha comprobado en la ciudad de Ghazir en Líbano (Huber, 2019). Este ahorro puede ser significativo si se toma en cuenta que los hogares (muchos de ellos constituidos por familias numerosas), soportan costes elevados para adquisición de combustible. Por ejemplo, en el campo de refugiados de Nyarugusu en Tanzania, el 53% de los hogares compra el combustible y gasta una media de 12 dólares al mes por hogar, cuando el salario mensual máximo no supera los 27 dólares (Rivoal & Haselip, 2017). Situación similar acontece en los campos de refugiados de Bokolmany, Melkadida, Kobe, Hilaweyn y Buramino en Etiopía, donde los ingresos medios de la población no superan los 28 dólares mensuales (Alianza Shire, 2023).

En cuanto a los campos de desplazados internos (IDPs) de Sudán del Sur, como parte del proyecto de biodigestores anaeróbicos y cocina limpia impulsado por la Organización Internacional para las Migraciones (OIM), se estima que los beneficios sociales por el uso de sistemas anaeróbicos para la producción de biogás pueden ahorrar entre 16 a 20 horas de trabajo al día, dedicadas a la recolección de leña en ausencia de los biodigestores. Como consecuencia de este significativo ahorro de tiempo, también aumenta el tiempo dedicado a la educación y al bienestar general, así como la reducción de la tasa de violencia de género para las mujeres y las niñas dedicadas a las labores de recolección de leña (ECHO, 2021). Beneficios similares se han evidenciado en proyectos humanitarios impulsados por el ACNUR y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) mediante el uso de cocinas con Gas licuado del petróleo (GLP) en el campo de refugiados de Nyarugusu en Tanzania, con un ahorro de 19 horas a la semana para la recolección de leña y una reducción de más de 6 horas de tiempo de cocinado al día (Rivoal & Haselip, 2017).

Las soluciones de cocina limpia también presentan co-beneficios económicos relacionados con los ODS y que tiene un alcance más amplio que el enfoque primordial sobre el ODS 7. En efecto, incorpora también los ODS 1, 3, 8, 13 y 15. Un informe comparativo de la *Gold Standard Foundation* (GSF) que abarca soluciones de cocina limpia mediante instalaciones de biogás a pequeña escala y estufas de combustión mejoradas en países en vías de desarrollo, proporciona una imagen completa de los beneficios monetarios de los proyectos combinados realizados en este ámbito. Como se ilustra en figura 17, el análisis muestra un mayor beneficio para los proyectos combinados de medios vida (ODS 1 y 8) con un total de 903 millones de dólares al año, seguido por los beneficios de salud (ODS 3) con 674 millones de dólares. Los beneficios de medios de vida combinan el ahorro de costes en carbón vegetal, leña y el valor asociado al ahorro de tiempo en la recogida de combustible y los tiempos de cocción. En el caso de los beneficios para la salud, el valor monetario está relacionado con la reducción de la contaminación del aire en los hogares. En términos del impacto medio por crédito de carbono emitido, la figura 17 también muestra que el beneficio de los proyectos de biogás es mucho mayor que los proyectos de estufas de combustión mejoradas. Eso se debe a los mayores beneficios que tiene para la salud el uso de biogás frente a los proyectos de estufas (GSF, 2021).

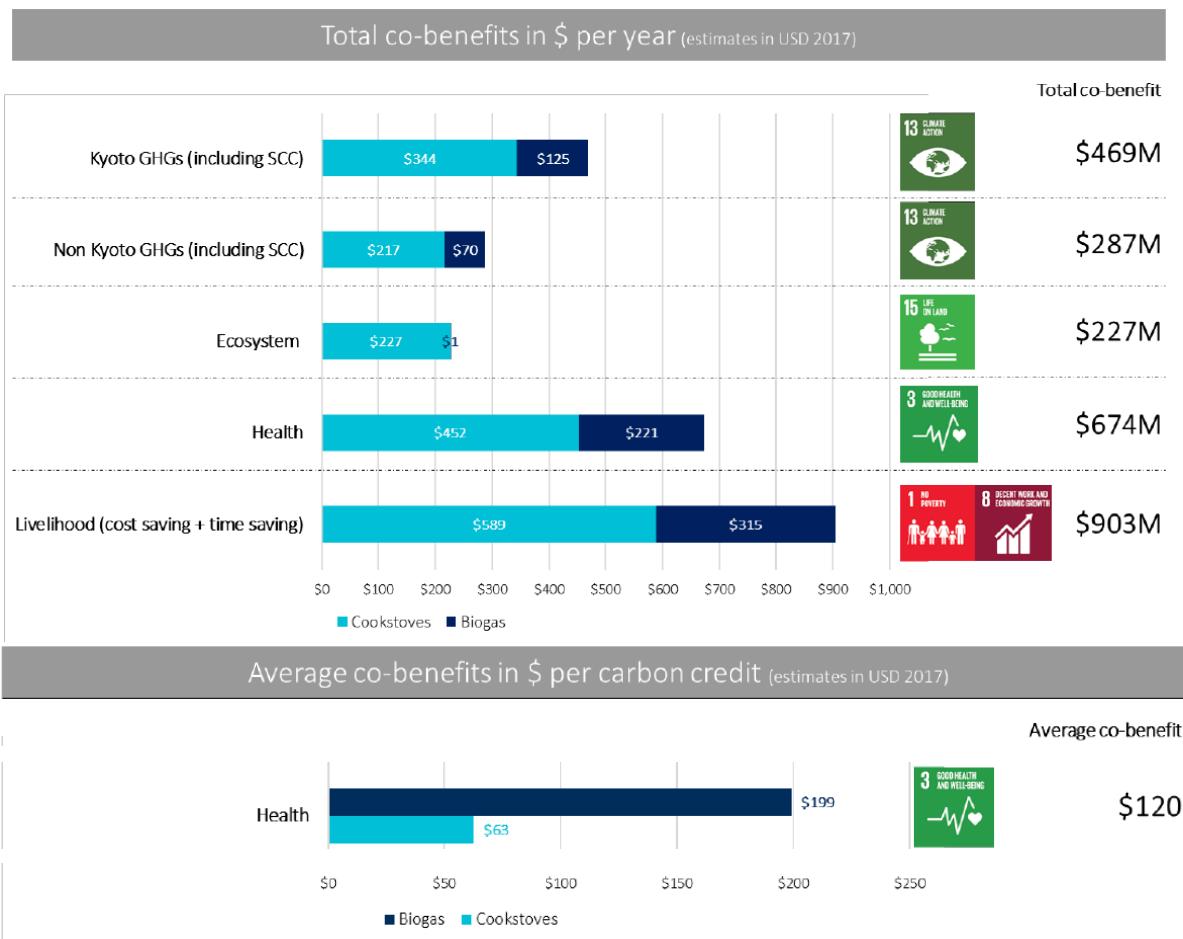


Figura 17. Beneficios económicos de proyectos de biogás para uso doméstico y estufas a combustión en relación con los ODS 1, 2, 8, 13 y 15 (GSF, 2021)

En cuanto al impacto de la sustitución del uso de cocinas de GLP por biogás, un estudio realizado en los once campos de refugiados rohingya en Cox's Bazar en Bangladés, ha determinado que se podrían sustituir 497.587 bombonas de GLP (Chowdhury et al., 2022), con un ahorro aproximado de 14 dólares mensuales por hogar correspondiente al gasto por bombona/mes (Uttom Rozario, 2018). Sin perjuicio de estos beneficios económicos, el proyecto de cocina limpia impulsado por el ACNUR y la UNEP en el campo de refugiados de Nyarugusu (Tanzania), ha reportado que el uso cocinas con GLP ha generado beneficios medioambientales de 3,7 tCO₂ equivalentes ahorradas por estufa/año, y 2.167ha de bosques rescatados (Rivoal & Haselip, 2017).

En términos operacionales, la OIM estima que la instalación de biodigestores anaeróbicos prefabricados en algunas zonas de Sudán del Sur podría reducir costes de transporte, mantenimiento y salarios de personal especializado de 13.000 a 4.000 euros al año (ECHO, 2021). La diferencia de coste de este tipo de sistemas también es importante dependiendo del tipo y del material utilizado. De este modo, para un biodigestor de cúpula fija de 3 m³ el coste puede oscilar entre los 3.193 y 4.471 dólares (Obileke et al., 2022), mientras que para el modelo mejorado de biodigestor portátil el coste suele ser de 1.775 dólares (HomeBiogas, 2023c).

Cabe destacar que las instalaciones de biogás en los campos de refugiados no solo tienen el potencial de cubrir el tratamiento de la FO. Una buena estrategia de recogida y separación de los residuos también permite el reciclaje de los residuos inorgánicos y facilita el compostaje. Pese a los múltiples retos que presenta el tratamiento previo de residuos en los campos de refugiados, en el caso del campo rohingya en Cox's Bazar, se ha estimado que un aumento del 25% de la tasa de recogida de residuos produciría 50% más de biogás. Además, esto se traduce en que los plásticos, el metal y los textiles (con mayor tasa de recuperación) pueden tener salida al mercado para la obtención de ingresos, ya que existe un alto potencial de venta para los materiales reciclables en Cox's Bazar. En promedio, los ingresos por la venta de materiales reciclables bordean los 1.75 dólares³/mes, mientras que los ingresos por la venta de compost oscilan entre los 10 y 11 dólares anuales (Chowdhury et al., 2022). La tabla 4 detalla algunos materiales reciclables y los ingresos obtenidos.

Tabla 4. Materiales reciclables, recuperables e ingresos obtenidos de la recogida de residuos en los campos de refugiados rohingya en Cox's Bazar (Chowdhury et al., 2022)

Materiales reciclables	Coste (USD/Kg)	Tasa de recuperación (%)	Ingresos obtenidos	Tasa de cobro (USD/mes)
Papel	0,16-0,21	40	Tasa de recogida normal	1,37
Plástico	0,25-0,29	50	Tasa de recogida (TC) + incremento del 5%	1,44
Vidrio	0,21-0,22	No disponible	(TC) + incremento del 15%	1,58
Metal	0,39-0,43	80	(TC) + incremento del 30%	1,78
Otros (textiles) ^a	0,17-0,18	75	(TC) + incremento del 50%	2,06

¹ Taka - 0.011 USD; ^a- El textil se suele recoger en las ciudades, por lo que el coste bajará a 10 tk/Kg.

En lo que respecta al digestato generado como subproducto de la digestión anaeróbica, el gasto en la compra de fertilizantes químicos se ha reducido significativamente en el campo de refugiados de Tongogara (Mavhunga, 2022a). Además, estudios realizados en la ciudad de Ghazir en la que hay una alta concentración de personas refugiadas de Siria y Palestina, indican que la producción de 200L de digestato por semana podría adquirirse por un precio de venta de 1 dólar/L por parte de los agricultores de la zona (Huber, 2019).

3.2 Beneficios medioambientales

La contribución medioambiental del uso de biogás en la cocina limpia en campos de refugiados presenta gran potencial para favorecer la circularidad, puesto que no solo es capaz de suministrar energía renovable en los contextos humanitarios, sino que también contribuye directamente a la reducción de los GEI, al aprovechamiento de los residuos y a la consecución de los ODS. El biogás desempeña un rol fundamental en la lucha mundial contra el calentamiento global, reduciendo de manera significativa las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles. En efecto, el biogás es un claro

³ Tasa de conversión de 1 Taka bengalí (BDT) a dólar estadounidense (USD) = 0.0093 (abril 2023)

sustituto del gas natural, del carbón vegetal y de la leña que normalmente se utiliza para cocinar en los campos de refugiados y desplazados. El reemplazo de la leña como fuente de combustible ayuda a reducir la deforestación y la erosión del suelo, así como la degradación de los ecosistemas, ya que mantiene la capacidad de los bosques para actuar como sumideros de carbono (Vögeli et al., 2014). Se estima que el uso de biogás en el campo de refugiados de Tongogara ayudaría a reducir la pérdida de 330.000 ha de bosque nativo al año producto del uso de leña con fines energéticos (Mavhunga, 2022b). En el caso de los campos de IDP de Sudán del Sur, se calcula que el uso de biogás desde una unidad de biodigestión para cocinar ayudaría a ahorrar entre 9,4 y 11,4 toneladas de consumo de leña año. Además, como se comentó en la sección 3.1, el digestato reduce el uso y consumo de fertilizantes artificiales, ayudando a evitar, paralelamente, las emisiones de CO₂ del sector industrial dedicado a la fabricación de fertilizantes químicos (Vögeli et al., 2014).

La producción de biogás también reduce los volúmenes de residuos sólidos vertidos a cielo abierto o depositados en vertederos, evitando la contaminación de las aguas subterráneas a través de lixiviados, reduciendo la toxicidad del suelo y la proliferación de los vectores infecciosos causantes de enfermedades derivadas de la descomposición de estos residuos (Huber, 2019).

La conversión de CH₄ en CO₂ y H₂O mediante combustión completa de los gases generados por la digestión anaeróbica, es otra vía por la cual se contribuye a la mitigación de los GEI, puesto que el CH₄ posee un GWP 21 veces superior al CO₂. Si bien la quema de biogás durante las labores culinarias también libera CO₂, este se emite con un efecto invernadero neutro, puesto que el origen del carbono es la biomasa vegetal utilizada para la alimentación del ganado, fijado mediante la fotosíntesis (Flotats & Feliu, 2019), lo que no ocurre cuando se queman los combustibles fósiles. En los campos de refugiados rohingya en Cox's Bazar se ha determinado que el 85% de las emisiones pueden evitarse utilizando biogás para cocinar en lugar leña, lo que se traduce en 20,69 millones de kg de CO₂ (Chowdhury et al., 2022), mientras que en los campos de IDPs de Sudan del Sur la reducción de las emisiones de GEI alcanzan las 13,32 toneladas de CO₂eq al año (ECHO, 2021).

4. El “internet de las cosas” (IoT) y la transformación digital en el mundo humanitario

La aceleración del progreso técnico en el universo digital ha transformado en cotidiano el empleo de dispositivos y aplicaciones que usan la computación en la nube, la analítica de datos a gran escala (“big data”), las cadenas de bloque (*blockchain*) o la inteligencia artificial (IA). Sin embargo, el progreso de la tecnología ha ido acompañado de resultados socialmente negativos, como la exclusión de una parte importante de la población mundial de los beneficios de la digitalización (CEPAL, 2021), debido, fundamentalmente, a razones económicas impulsadas por los costes de conexión, el acceso a dispositivos y a los altos costes de inversión por el despliegue de la infraestructura de banda ancha (Comisión Europea, 2023). En el contexto humanitario y de protección de las personas refugiadas, esta situación puede agudizarse en las zonas de intervención debido a razones sociopolíticas en los países de acogida relacionadas al financiamiento de proyectos al largo plazo de infraestructuras robustas en asentamientos supuestamente temporales (Harild et al., 2015). No obstante, soluciones basadas en el internet de las cosas (Internet of Things-IoT) pueden cambiar la forma en que las organizaciones humanitarias monitorean las operaciones en los campos de refugiados y desplazados. La necesidad de nuevos enfoques de vanguardia para la ayuda humanitaria ya está comenzando a dar frutos importantes como la creación de comunidades energéticas en el campo de refugiados de Dadaab en Kenia, que contribuyen al desarrollo de la generación de energía distribuida mediante la entrega de kits de monitorización inteligente que proporcionan datos en tiempo real con el objetivo de fomentar pautas de empleo energético más racionales mediante alertas telefónicas (Maalim et al., 2021).

4.1 Solución para el control y monitoreo del biogás

Las tecnologías utilizadas en los sistemas de control y monitoreo para la producción de biogás a pequeña escala en el sector agrícola y ganadero suelen ser las mismas que las utilizadas en el sector industrial. De hecho, los transmisores analógicos y digitales son equipos habituales en los sistemas de control de biogás (Silva et al., 2019) y pueden ser utilizados en contextos rurales y periurbanos donde se asientan la mayor parte de los campos de refugiados. En general, no es fácil encontrar datos sobre la aplicación de este tipo de sistemas durante la producción de biogás a nivel doméstico, aunque existen experiencias en el campo de refugiados de Kigeme, en Ruanda, donde se desplegaron sensores inalámbricos SUM para el monitoreo de cocinas o estufas tradicionales con el objetivo de medir la temperatura interior y exterior, y recabar datos que ayuden a diseñar y ofrecer soluciones energéticas sostenibles y asequibles. Dichos datos se almacenaban localmente en una tarjeta SD instalada y conectada a una placa Arduino que transmitía la información a un servidor remoto alojado en la Universidad de Coventry, UK mediante comunicación GSM-MQTT (Halford et al., 2022).

Para hacer frente a las necesidades de acceso a la energía relacionadas con la cocina limpia en los campos de refugiados y cumplir con el desafío de la energía limpia del ACNUR (UNHCR, 2023a), las agencias humanitarias requieren datos sólidos, válidos y significativos que documenten prácticas energéticas cotidianas. En ese sentido, el control y monitoreo de un sistema de producción de biogás juega un papel importante para lograr un bioproceso estable y garantizar un alto rendimiento en la obtención de biogás. Como se ilustra en la figura 18, el proceso de digestión anaeróbica conlleva variaciones pH, temperatura y liberación de ácidos grasos volátiles que podrían monitorearse para mejorar la eficiencia del proceso (Cruz et al., 2021).

Por otro lado, en los campamentos con gran superficie, como el de Zaatari con 9 km² (La Información, 2017) o el de Kutupalong con 15 km², gran parte de la población económicamente activa realiza actividades laborales de manera simultánea vinculadas principalmente al ámbito agrícola y comercial alejados de los hogares. De este modo, aplicaciones digitales basadas en las IoT, permitiría a pequeños agricultores, comerciantes y la comunidad en general, monitorear a distancia y en tiempo real la provisión de biogás para cocinar en los hogares, así como a gestionar de manera adecuada los residuos orgánicos necesarios para la alimentación del biodigestor y actuar frente a posibles fugas del sistema. Además, desde el punto de vista del despliegue de las operaciones humanitarias, el uso de aplicaciones digitales basadas en las IoT para agencias y ONGs que trabajan en estas zonas con proyectos de intervención de aprovisionamiento energético, podrían mejorar los mecanismos de seguimiento de los parámetros del proceso desde la nube con el objetivo contrarrestar posibles incidencias y monitorear el sistema de biodigestión durante los primeros meses de la puesta en marcha del proceso de forma conjunta con la comunidad beneficiaria.

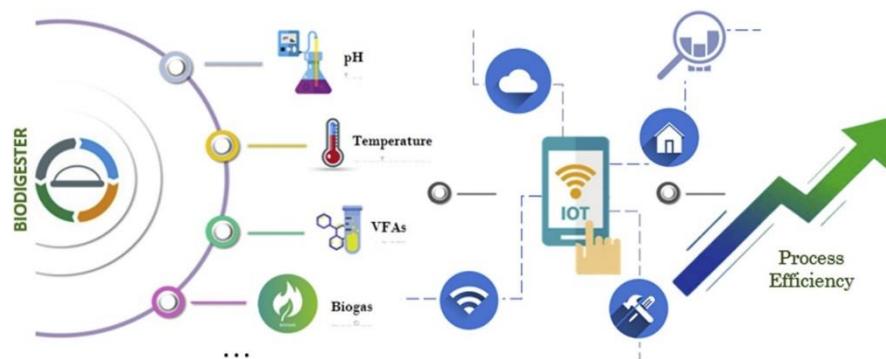


Figura 18. Esquema general de monitoreo de los parámetros de un biodigestor mediante IoT (Cruz et al., 2021)

4.2 Tecnología LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de comunicación de redes de largo alcance, de bajo consumo energético y muy eficiente a largas distancias y desde ubicaciones remotas. Esta tecnología de bandas de radiofrecuencia pertenece a las redes de largo alcance y baja potencia (LPWAN) y, que, en combinación con sensores inalámbricos, se adecuan bastante bien para aplicaciones en el campo de la IoT.

La arquitectura de una red LoRaWAN consta generalmente de nodos o sensores inalámbricos alimentados por una batería que se comunican con una o varias puertas de enlace y un servidor LoRa que proporciona conectividad a aplicaciones o terminales en línea, es decir, la red LoRaWAN está conformada por nodos que recopilan la información de los sensores y que envían los datos a un nodo final o puerta de enlace (Gateway) con modulación LoRa que a su vez se encarga de enviar los datos recibidos a la base de datos mediante conexión Wifi para visualizarlos en una aplicación.

La distancia real entre el Gateway y los sensores dependerá de la reflexión, refracción y atenuación de los objetos que se encuentren en el camino, como los edificios existentes en una zona determinada, así como otros efectos tales como los niveles de interferencia del entorno en el que operan. De este modo, en zonas rurales, se puede esperar un alcance de entre 10 a 15km (Semtech, 2023), mientras que en las grandes ciudades esta distancia podría reducirse solo de 2 a 4km (limitado por mayores niveles tanto de obstrucción de los enlaces inalámbricos, como de los niveles de interferencia electromagnética), pero que, en cualquier caso, supera a tecnologías como WiFi o Bluetooth en términos de alcance.

La propia puerta de enlace recibe los datos y los envía al servidor de la red. La comunicación entre la puerta de enlace y el servidor requiere de una conexión a través de radiofrecuencia móvil de 3G/4G/5G, WiFi, Ethernet, fibra óptica o enlaces de radiofrecuencia de 2,4 GHz (The Things Network, 2023), entre otras. El servidor de red gestiona toda la red LoRaWAN, permitiendo visualizar los datos para su análisis, así como la optimización de procesos mediante la interacción con aplicaciones y dispositivos de la IoT.

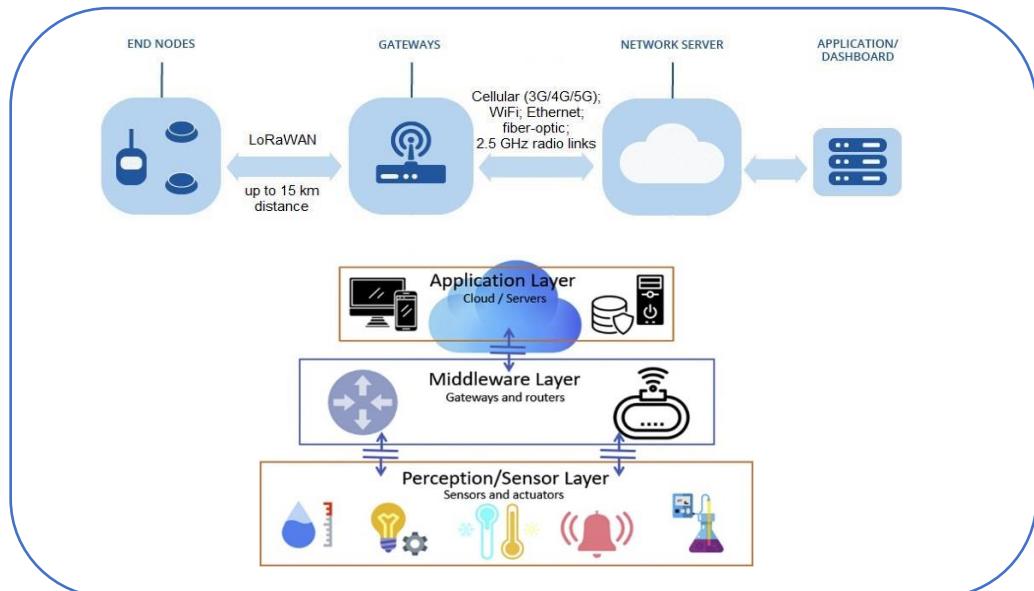


Figura 19. Red LoRaWAN. Adaptación desde (Borgwardt, 2022) y (Cruz et al., 2021)

4.3 Aplicación de la gestión remota

Las tecnologías de monitoreo a distancia y en tiempo real requieren de un cierto nivel de infraestructura tecnológica con una mínima fuente de alimentación de energía y de acceso a internet. La tecnología LoRaWAN se presenta entonces como una alternativa para realizar la supervisión y la gestión de los parámetros operacionales del biodigestor en zonas remotas. Estudios realizados en los sectores acuícola (Bates et al., 2021), agrícola (Arshad et al., 2022) y ganadero (Gerard, 2022) muestran una perspectiva prometedora para mejorar la eficiencia de los procesos del sector primario, apoyando a las personas en la toma de decisiones en base al conjunto de datos proporcionado desde la red de sensores de manera precisa, rápida e informada y mejorando la capacidad de respuesta ante fenómenos naturales cambiantes como riadas, tormentas, ventiscas, etc . Por su parte, el ACNUR viene revisando el panorama del IoT (LoRaWAN, Sigfox, NB-IOT, LTE, 3G, 4G, 5G, Satélite) para dar respuesta en materia de agua, saneamiento e higiene en situaciones de emergencia, con el fin de garantizar la supervivencia y la prevención de enfermedades de la población desplazada por la fuerza (Novo, 2020). En colaboración con The Things Network, la “start-up” francesa GreenCityzen ha utilizado dispositivos basados en LoRa y desplegado una red LoRaWAN para ofrecer una solución integral que garantiza el suministro de agua potable a 2 millones de refugiados en África (Alibou, 2020). Proyectos piloto desarrollados en campos de refugiados en Uganda, en el norte de Irak y en el campo de Cox's Bazaar, han mostrado que los sensores para la monitorización en tiempo real de los sistemas de agua con LoRaWAN son capaces de enviar datos a más de 25 km de distancia. La instalación de sensores LoRaWAN para la gestión remota también ha incluido el monitoreo del nivel de depósitos de agua, la turbidez, el caudal y otras lecturas como el cloro.

Estas soluciones ayudan a garantizar la visibilidad y la transparencia sobre el acceso a servicios de agua y saneamiento de la población refugiada en situaciones de crisis. Además la optimización del suministro de agua permite ahorrar costes, aumentando la rentabilidad y maximizando el impacto de la ayuda humanitaria, reduciendo al mínimo las fugas de agua y ajustando los elementos infra-dimensionados y sobredimensionados del sistema en los entornos humanitarios (Novo, 2020).

5. Planteamiento del Trabajo y Objetivos

Históricamente, la generación biogás y biometano ha sido una práctica extendida para la obtención de energía renovable a través de la regeneración de los materiales descartados durante ciclo biológico, abaratando costes y reforzando los circuitos de la economía circular. Además, la transición energética hacia el uso de energías renovables que mitiguen los efectos del calentamiento global, constituye un paso clave para alcanzar los objetivos de descarbonización de la economía a largo plazo (Parlamento Europeo y del Consejo, 2018)

Desde la perspectiva de los países en vías de desarrollo y PMA donde se encuentra la mayor cantidad de personas refugiadas y desplazadas por la fuerza, la generación de biogás podría constituir una solución eficiente para la gestión de los biorresiduos y el acceso a energía limpia que mejore la calidad de vida de sus habitantes. Este planteamiento se refuerza desde las distintas publicaciones del sector humanitario que hacen referencia a la generación de energía a nivel doméstico mediante biogás y que datan desde los años noventa con una serie de proyectos impulsados por el ACNUR con el objetivo de satisfacer las necesidades energéticas de las personas refugiadas mediante tecnologías apropiadas y adaptadas al contexto (Owen, 2002). Hoy en día, y dado que las soluciones energéticas desde la esfera humanitaria son un tema transversal desde el punto de vista social, medioambiental y económico, diversas ONGs trabajan en colaboración con actores locales y en consorcio con agencias de la ONU, gobiernos, empresas e instituciones académicas para abordar los retos relacionados con el acceso a

energía limpia, la circularidad y la sostenibilidad, con el fin de preservar el entorno natural, crear comunidades resilientes al cambio climático y proporcionar condiciones de vida más seguras, saludables y dignas para las personas refugiadas (UNHCR, 2022a).

Así, en base a lo anterior y con el **objetivo principal** de buscar soluciones basadas en la naturaleza dirigidas a la producción de biogás a partir de residuos orgánicos en los contextos de acción humanitaria, este trabajo de Fin de Máster pretende vincular los procesos de la biotecnología anaeróbica con la transformación digital de los parámetros de control de dicho proceso. Para ello, se plantea la puesta en marcha de un biodigestor prefabricado adaptado a los contextos de campos de refugiados con los siguientes propósitos:

- a) generar energía térmica para actividades domésticas de cocinado y suministrar materiales estabilizados (digestato) como un biofertilizante para las zonas de cultivo;
- b) monitorizar los parámetros de control del proceso de biometanización por medio de un sistema inteligente.

En base a lo anterior, se plantean los siguientes **objetivos específicos y preguntas de investigación**:

- *Objetivo Específico 1:* Evaluar la viabilidad técnica de la producción de biogás a pequeña escala mediante la instalación y puesta en marcha de un biodigestor para obtener biogás para el cocinado de alimentos en contextos humanitarios utilizando sustratos similares a los usados en dichos contextos y utilizar el subproducto generado en un ensayo de abonado en cultivo de lechuga.
 - Pregunta investigación 1: Desde el punto de vista del tipo, la calidad del sustrato y el rendimiento del biogás ¿en qué medida se puede generar biogás mediante la instalación de un biodigestor a pequeña escala en contextos de acción humanitaria utilizando los recursos y residuos orgánicos disponibles?
 - Pregunta investigación 2: Respecto a los retos y oportunidades de generación local de biogás utilizando los recursos y residuos orgánicos disponibles ¿qué tipo de ventajas y perspectivas futuras ofrece un posible escalamiento del biodigestor en contextos humanitarios?
- *Objetivo Específico 2:* Desarrollar un sistema inteligente de monitorización, control y recolección de datos del biogás basado en la tecnología LoRa para mejorar la gestión y eficiencia del proceso.
 - Pregunta de investigación 3: ¿Qué ventajas y beneficios representa para las comunidades locales utilizar el protocolo LoRaWAN para el monitoreo de un biorreactor en materia de generación de energía térmica?

6. Experimental

6.1. Diseño del experimento.

La investigación se planteó en dos fases (figura 20):

- La primera comprendía la instalación de un sistema previo de biodigestión anaeróbica a escala de laboratorio. Con esta fase se pretendía testear el sustrato de activación (SdA), procedente de un digestato de estiércol de vacuno, y poner a punto el sistema de sensorización mediante los instrumentos disponibles desde la tecnología y las aplicaciones ofrecidas por el IoT.

- La segunda planteaba la instalación de un biodigestor a escala domiciliaria (marca comercial *HomeBiogas*) con una capacidad nominal de 2 m³ en la finca de prácticas de la UPNA para llevar a cabo los diferentes ensayos, tanto a nivel de los sustratos utilizados, como del subproducto generado y empleado en forma de fertilizante (digestato) para los bioensayos de cultivo. De manera paralela, en esta fase, se planteó también la inclusión de los microcontroladores (basados en plataformas de desarrollo electrónico de Arduino) y los sensores escogidos en las pruebas de laboratorio para los ensayos llevados a cabo en la finca de prácticas, además de la configuración de la plataforma y las aplicaciones basadas en IoT utilizadas para la monitorización de las variables de operación del bioprocreso.

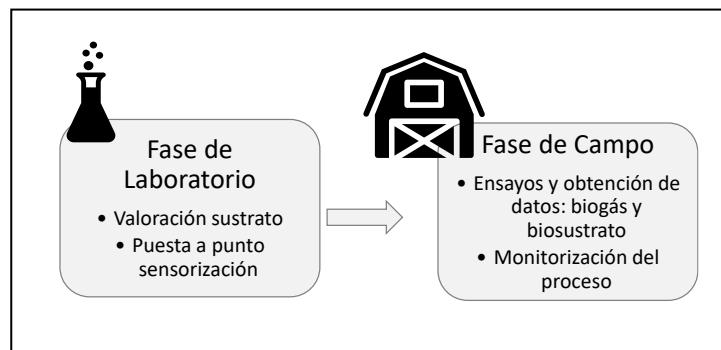


Figura 20. Fases del diseño del experimento

El desarrollo del diseño experimental planteado conllevó la utilización de los materiales y métodos que se describen en los siguientes apartados.

6.2 Sistemas empleados para la producción de biogás

6.2.1 Sistema de digestión anaerobio discontinuo a escala de laboratorio

El sistema empleado para el proceso de digestión anaerobia consistió en el montaje de un digestor anaerobio discontinuo de una sola etapa a escala de laboratorio operado con un tiempo de retención hidráulica de 10 días y en la instalación de los sensores mencionados en la tabla 7. La figura 21 muestra el sistema experimental empleado. Se utilizó un matraz Kitasatos de 2L herméticamente cerrado que contenía la entrada del influente y la salida del efluente para permitir el muestreo y que se mantuvo en un baño de agua con agitación. El Kitasatos se conectó con otro matraz mediante un tubo de goma que permitía la salida del biogás y con un matraz intermedio para la trampa de vapor de agua.

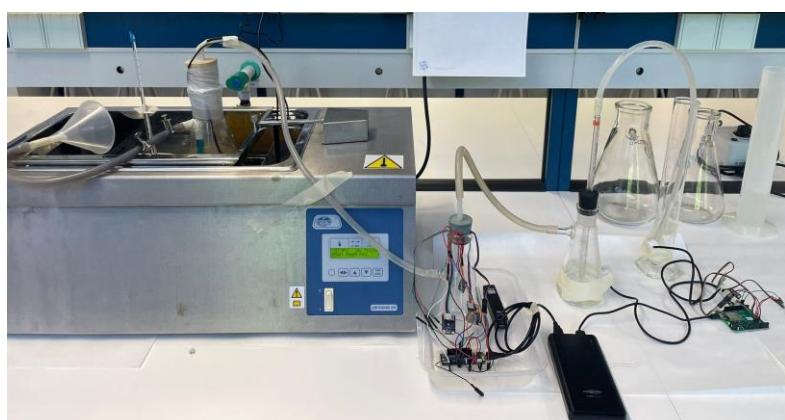


Figura 21. Digestor anaerobio discontinuo de una sola etapa y sistema de sensorización con control de temperatura y pH (dentro del digestor), de gases (en el primer matraz) y de nivel líquido (en el segundo matraz y en la probeta)

El sistema de digestión discontinua se configuró como un experimento de potencial bioquímico de metano (PBM), con el objetivo de estudiar el potencial del sustrato de activación disponible (SdA) y otros para la producción de biogás en la planta de biodigestión instalada en la finca de prácticas simulando condiciones similares de presión, pH y temperatura.

Para la inoculación del sustrato se realizó una secuencia de siete lotes (*batch*) de alimentación. La composición y condiciones de cada lote de alimentación se indica en la tabla 5.

Tabla 5. Secuencia y composición de *batch* de alimentación al digestor

	Volumen y Composición del sustrato	Condiciones operativas de la incubación
Batch 1	750 ml de solución de SdA al 5% de materia seca	baño de agua a 37°C/agitación de 22rpm
Batch 2	50 ml de leche con 1,5 g de mantequilla	baño de agua a 37°C/agitación de 22rpm
Batch 3	150 ml de leche con 1,5 g de mantequilla	baño de agua a 37°C/agitación de 40rpm
Batch 4	50 ml de leche con 1,5 g de mantequilla	baño de agua a 37°C/agitación de 40rpm
Batch 5	50 ml de leche con 1,5 g de mantequilla	baño de agua a 37°C/agitación de 40rpm
Batch 6	50 ml de solución de BHI Broth (<i>brain heart infusion</i>) de concentración 37g/l	baño de agua a 37°C/agitación de 40rpm
Batch 7	50 ml de solución de BHI Broth (<i>brain heart infusion</i>) de concentración 37g/l	baño de agua a 37°C/agitación de 40rpm

El biogás recogido se midió basándose en el volumen de un globo de latex de 0,5L y a partir de las concentraciones de CO₂, y una mezcla de gases con presencia de CH₄ arrojadas por el proceso biodigestión para su detección con el sistema de telemedida y sensorización mediante la red LoRaWAN. Del mismo modo, las temperaturas y el pH se controlaron y registraron diariamente durante el periodo experimental.

6.2.2 Sistema de digestión anaerobio semicontinuo de carga por lote a escala domiciliaria

El sistema empleado para el proceso de digestión anaeróbica consistió en un biorreactor semicontinuo a escala domiciliaria del modelo comercial *HomeBiogas 2.0* con un volumen de 1.200L en la cámara de digestión y de 700L en la cámara de almacenamiento de biogás (gasómetro) que permite la salida de gas mediante una tubería conectada directamente a una cocinilla para preparar alimentos. La monitorización de los parámetros del proceso incorporó sensores de pH y temperatura al interior de tanque de digestión y de nivel de líquido al exterior del biodigestor. El sensor de CO₂ se utilizó de manera puntual para la detección de fugas del sistema y durante el proceso de cocción. Un esquema del sistema experimental empleado se ilustra en la figura 22.

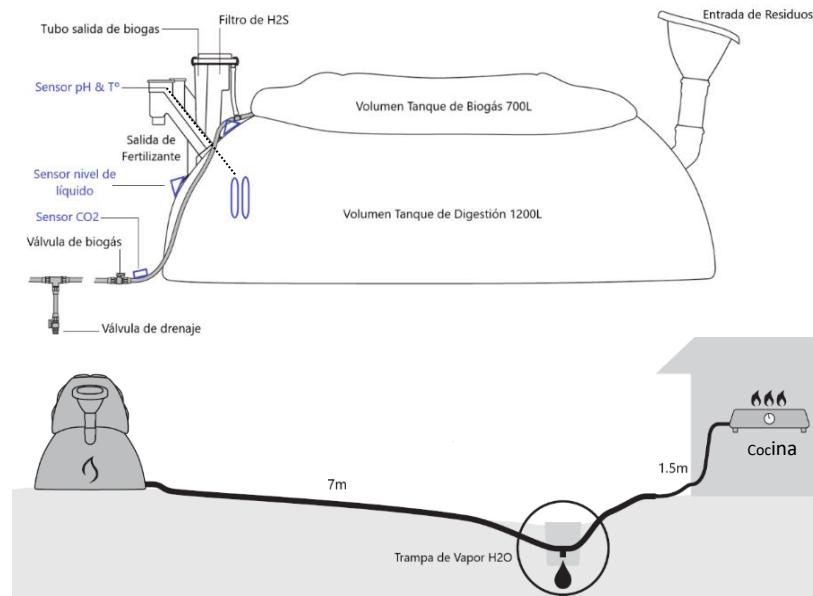


Figura 22. Esquema general del montaje del biodigestor HomeBiogas2.0
 (Adaptado de (HomeBiogas, 2023a))

El biodigestor seleccionado se instaló en junio de 2023, iniciándose el trabajo de campo en julio de 2023 una vez asegurado el sistema. No obstante, gran parte de las pruebas fueron realizadas durante el mes agosto, septiembre y octubre de 2023, tomando en cuenta las pruebas sensorización y los factores meteorológicos de la cuenca de Pamplona.

El tipo de sustrato inoculado para la activación y la estabilización del sistema están detallados en los apartados 6.3.2 y 6.3.3. Se siguieron las recomendaciones indicadas por del sistema HomeBiogas2.0 (HomeBiogas, 2023a) añadiendo una mezcla de 100L de estiércol fresco con 100L de agua programado en distintos días a lo largo del periodo de experimentación como se muestra en la figura 23. Cabe destacar que alimentación con biorresiduos se realizó una vez que el biodigestor estuvo estabilizado y con una flora bacteriana activa. La evidencia de dicha estabilización estuvo dada por las características de la llama que se obtiene al quemar el biogás en la cocinilla (llama de color azul).

La puesta en marcha del biodigestor se inició con una mezcla de 200L de sustrato de activación (SdA) y de residuos lácteos y harina con un contenido de 0,5% MS y 45L de SdA con un contenido de 66% de MS. Posteriormente, se enrasó el biodigestor con agua hasta los 800L completando un volumen de 1.045L, dejando 155L para introducir la mezcla de sustratos señalados en los apartados 6.3.2 hasta completar un volumen total 1.200L. Teniendo en cuenta que el SdA contiene un porcentaje total de MS del 66,5% y el SdE un contenido en MS del 7,8 %, se planteó aportar un sustrato con un porcentaje alrededor de 4% de ST en el digestor, donde: 1,27% procede del SdA de la mezcla inicial, el 0,94% del SdA puro y el 1,34% del SdE. De este modo, se estimaron 13,3kg de MS de SdA de mezcla inicial, 10,3kg de MS de SdA puro y 15,6kg de MS de SdE.

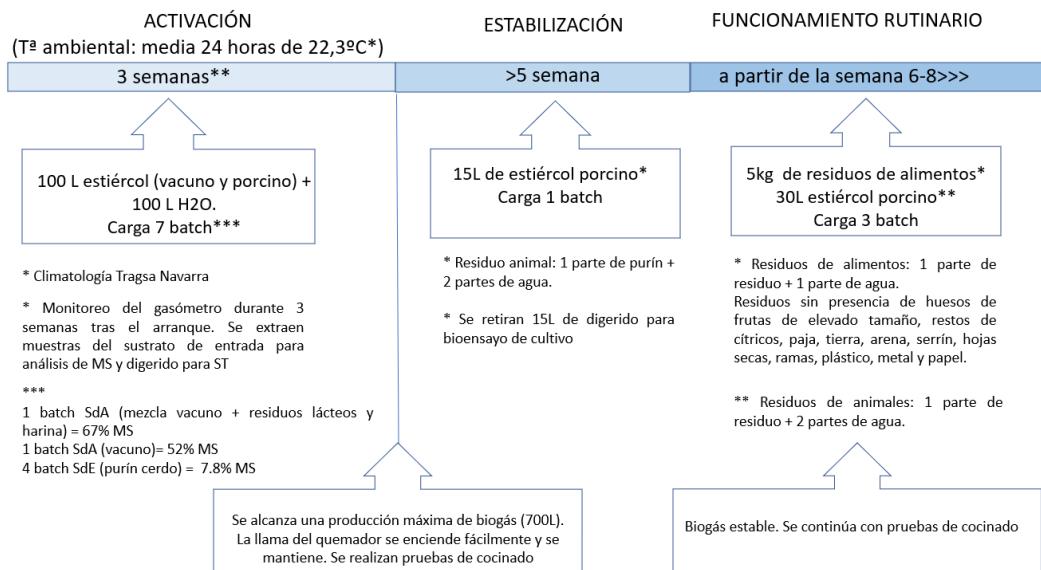


Figura 23. Esquema de las fases de funcionamiento del digestor (Elaboración propia)

La sensorización y el monitoreo del sistema mediante la red LoRaWAN se realizó durante 43 días, incluyendo pruebas de cocinado con agua y alimentos una vez obtenido el biogás. Las mediciones de CO₂ en el biogás se realizaron en tres momentos diferentes durante la fase de estabilización con un equipo analizador de CO₂ de alta concentración EXTENDAPAK® 6.0 de un rango de medición de 0-100%. Para ello, se realizó la calibración del equipo analizador de CO₂ con un gas patrón puro de CO₂ y N₂ en un panel de gases a las siguientes concentraciones: 5% CO₂/95%N₂, 10% CO₂/90%N₂, 20% CO₂/80%N₂, 30% CO₂/70%N₂, 40% CO₂/60%N₂ y 50% CO₂/50%N₂.

6.3. Caracterización de materias primas e inóculos

6.3.1 Determinación de sólidos totales por análisis gravimétrico

Se ha realizado un análisis gravimétrico de las muestras del influente (sustrato inoculado) y efluente de la biometanización (digerido) para estimar los sólidos totales (ST) y los sólidos volátiles (SV) de los sustratos siguiendo el protocolo de (Labatut & Gooch, 2012). El análisis se realizó por duplicado a seis muestras (doce en total) que se sometieron en una primera fase a un secado en estufa de aire caliente a 105°C durante 24h hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en un horno mufla a 550°C durante 1h para la determinación de la fracción mineral.

Los ST y SV respecto de las materias primas introducidas al biodigestor se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$ST \left(\frac{g}{ml} \right) = \frac{C - A}{B - A}$$

$$SV \left(\frac{g}{ml} \right) = \frac{C - D}{B - A}$$

Donde:

A= Peso crisol vacío

B= Peso crisol + muestra húmeda

C= Peso crisol + materia seca después del secado a 105°C
 D= Peso crisol + cenizas después de la combustión a 550°C

Para este ensayo se tomaron alícuotas de 10ml para las muestras del efluente y de 3g para las muestras del influente distribuidas en crisoles, enfriadas en un desecador luego del proceso térmico y pesadas antes y después en una balanza de alta analítica de la alta precisión (figura 24).

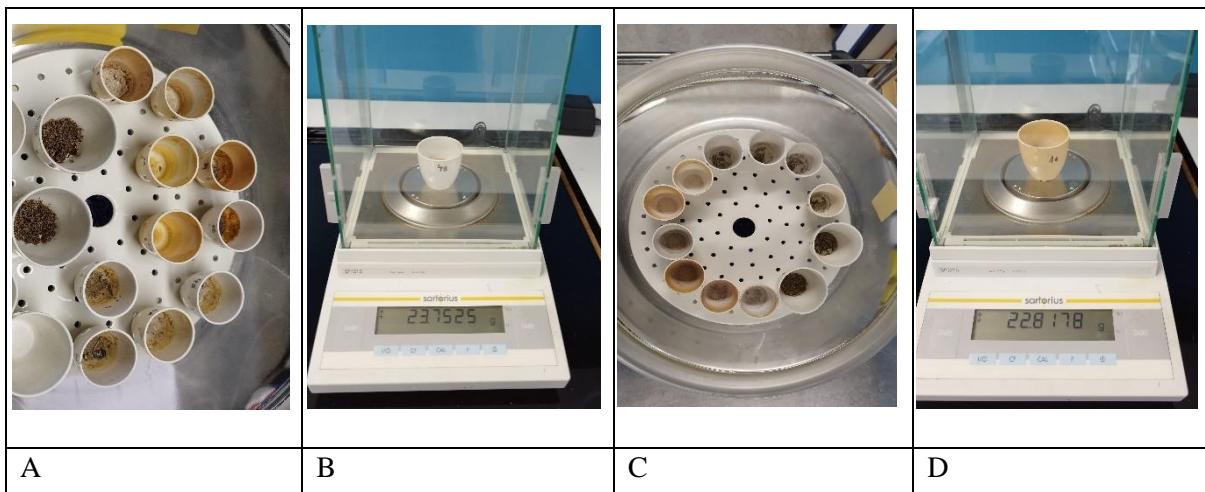


Figura 24. A y B: Muestras y pesaje de materia seca después del secado; C y D: muestras y cenizas después de la ignición

6.3.2 Sustratos de origen animal para la biodigestión anaeróbica

El estiércol de vacuno co-digerido, o sustrato de activación (SdA), corresponde con la fracción sólida obtenida por centrifugación procede de planta de una planta de digestión anaerobia a escala industrial localizada en el valle del Ebro. La materia prima de dicha co-digestión está formada por residuos procedentes de vacuno lechero, residuos sólidos urbanos, lodos y otros restos orgánicos.

Desde el punto de vista de los sustratos utilizados y el digerido procedente de la biometanización, se han determinado los ST y SV del sustrato de activación (SdA) utilizado para la inoculación del sistema desde estiércol de vacuno co-digerido de una planta de biometanización localizada en el valle del Ebro, así como del sustrato de estabilización (SdE) de purín de cerdo proveniente de la explotación ganadera dedicada al cebado industrial de cerdos ubicada en Biurrun (Navarra). Seguidamente, se procedió con el arranque del biodigestor mediante la adición del SdA y del SdE y se analizaron los productos y subproductos obtenidos de la biodigestión anaeróbica en su estado líquido y gaseoso.

El SdA para el utilizado para el ensayo de digestión a escala de laboratorio obtuvo un porcentaje de humedad del 59,30% medido con una báscula de humedad (figura 25), es decir, con un contenido en materia seca (MS) del 40,7%, mientras que el contenido de materia seca del SdA utilizado en los ensayos de la finca de prácticas tuvo una media del 42%.

El purín de cerdo fresco o SdE procede de la balsa de purines de una explotación ganadera dedicada al cebado industrial de cerdos ubicada en Biurrun (Navarra). Este purín presenta un porcentaje de humedad del 92,2% y un contenido en materia seca (MS) del 7,8 %. La MS se ha determinado luego de someter el SdE a 70°C en un horno de secado durante de 96 horas hasta alcanzar un peso constante debido a su alto contenido a agua y medido en báscula de alta precisión.

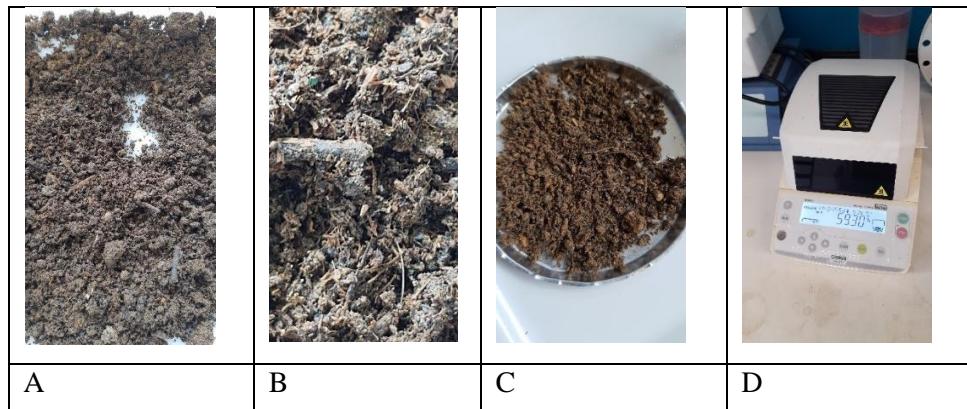


Figura 25. A y B: Sustrato inicial en húmedo; C: sustrato inicial deshidratado; D: báscula de humedad.

6.3.3 Biorresiduos para la biodigestión anaeróbica

El biorresiduo (B), fracción orgánica de los residuos generados en la cocina del comedor central de la UPNA, está constituido por peladuras de verduras y patatas, en general no lignificados y con apariencia pastosa y húmeda. No se determinó MS y humedad, puesto que solo fue testeado en función del efecto del *batch* de biorresiduos en la producción volumétrica de biogás.

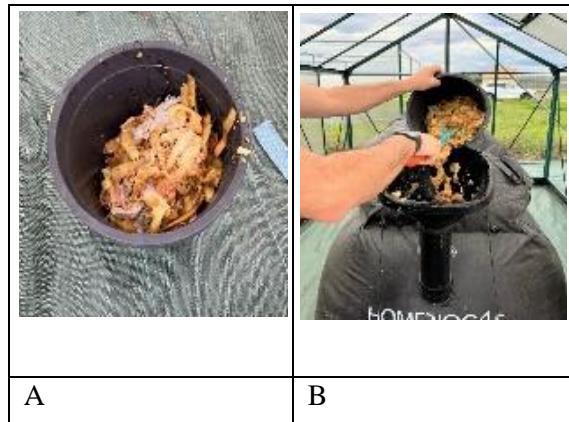


Figura 26. A. Biorresiduo; B. Biorresiduo alimentado al biodigestor

6.4. Método experimental para el ensayo del fertilizante: Bioensayo de cultivo

6.4.1. Materia Vegetal y Fertilizantes

Para el bioensayo de cultivo de lechuga (*Lactuca sativa var. Batavia*) se utilizó el efluente de la biometanización como fertilizante con tres dosis líquidas diferentes (10, 20, 40 y 80 ml) y se comparó con otros tres abonos, a saber: abono mineral, té de compost y compost sólido (turba). Estos dos últimos abonos provienen del programa de compostaje de biorresiduos de los comedores y de restos de poda de la UPNA.

Se emplearon 56 plántulas de lechuga (*Lactuca sativa var. Batavia*) como cultivo hortícola para el bioensayo de los fertilizantes. Su implantación se realizó en formato de taco proveniente de un vivero comercial ubicado en Sangüesa (Navarra) como se muestra en la figura 27.



Figura 27. Plántulas de lechuga utilizadas en el bioensayo

El desarrollo del bioensayo incorporó tres tipos de fertilización orgánica y una fertilización mineral. Los fertilizantes aplicados en el ensayo fueron los siguientes:

- Abono mineral complejo granulado (9% N, 18% P₂O₅, 27% K₂O)
- Digerido de la biometanización (efluente biodigestor). Procede de la digestión anaerobia de una base de digerido de una planta comercial de biometanización más purines de cerdo frescos.
- Té de compost del “programa de compostaje de la UPNA” obtenido mediante extracción en frío durante 72 horas en solución 1/10 p/v.
- Compost del programa de compostaje de la UPNA obtenido del compostaje de biorresiduos de la cocina de los comedores estudiantiles y restos de poda de los dos campus en Pamplona.

Las macetas de los ensayos, excepto las de los tratamientos con compost, fueron rellenadas con turba rubia no abonada, encalada con CaCO₃. En el fondo de las macetas se incluyó una capa de 2 cm de arlita para facilitar el drenaje en las macetas y evitar la asfixia radicular.

El bioensayo se realizó con cultivos de lechuga (*Lactuca sativa var. Batavia*) sobre un lecho de invernadero con siete (7) tratamientos y cinco (5) tipos diferentes de abono, a saber: un efluente de proveniente de la biometanización (D), abono mineral (M), té de compost (TC) compost sólido (CO) y un testigo no abonado (T). De cada tratamiento se dispusieron 8 macetas siendo cada una de ellas una repetición del ensayo. Los tratamientos y repeticiones estudiados se muestran en la figura 28.

En total se emplearon 56 macetas con una lechuga cada una. 24 fueron utilizadas para los tratamientos con el digerido de la biometanización (con tres dosis crecientes) y 8 por cada uno de los diferentes abonos empleados (mineral, té de compost, compost sólido). Otras 8 se dispusieron en macetas únicamente con turba, sin ningún fertilizante, y que constituyeron el testigo del ensayo.

El ensayo se regó por goteo, con un gotero de 2 l/h de caudal por maceta o planta. La frecuencia del riego por goteo se estableció de 5min diarios durante las dos primeras semanas y de 2 minutos diarios la última semana del bioensayo. El tiempo de riego dependió del control de los drenajes en los platillos de las macetas. Se intentaba que siempre hubiera un mínimo de drenaje, pero que este no se acumulara.

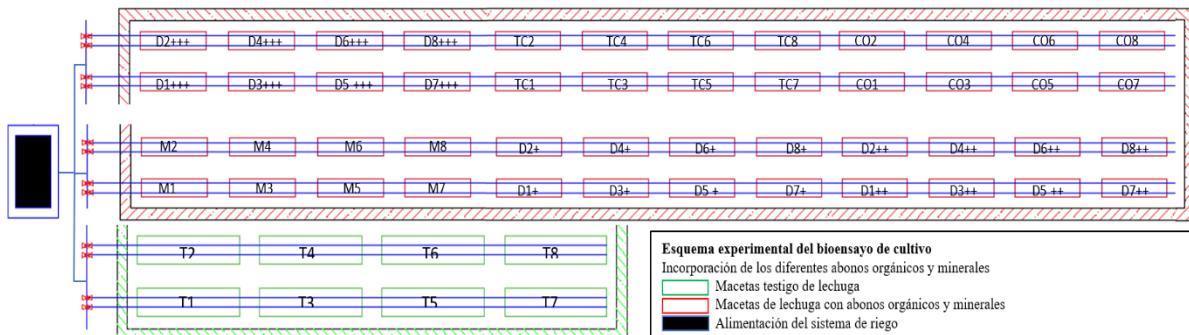


Figura 28. Esquema experimental del bioensayo de cultivo de lechuga (Elaboración propia)

6.4.2 Ciclo del cultivo

En la figura 29 se recoge el periodo relativo al ciclo de cultivo. Una vez incorporados los fertilizantes minerales y orgánicos y, distribuidos de manera homogénea, se procedió a la implantación del cultivo de lechuga compactando con turba en las 56 macetas. Al momento de la plantación, las plantas tenían de tres a cuatro hojas. El cultivo se desarrolló con normalidad y no fue necesario aplicar ningún tratamiento fitosanitario. Semanalmente se controló el pH de los drenajes para comprobar que este no bajaba de 6.

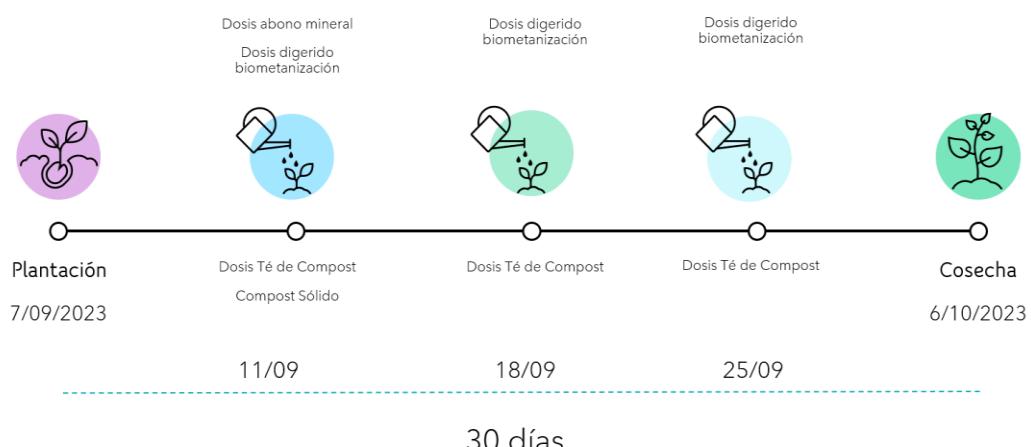


Figura 29. Ciclo del bioensayo de lechuga (elaboración propia)

6.4.3 Dosificación de los fertilizantes

El diseño del plan de fertilización de los cultivos de lechuga se hizo en base a las experiencias previas del grupo de investigación con este tipo de ensayos. Se pretendía garantizar que con el mineral las plantas iban a tener plenamente cubiertas sus necesidades de nutrientes. En la tabla 6 se reúnen las dosis de los fertilizantes aplicados a las macetas durante el periodo de cultivo.

Tabla 6. Dosis de los fertilizantes aplicados a las macetas

Fertilizante	Dosis	Frecuencia
Abono mineral (M)	0,26 g (9%N, 18%P ₂ O ₅ , 27% K ₂ O) /maceta	al día 4 de ensayo
D+ Digerido de biometanizacion	10, 20 y 20 ml/maceta	a los 4, 11 y 18 días del ensayo
D++ Digerido de biometanizacion	20, 40 y 40 ml/maceta	a los 4, 11 y 18 días del ensayo
D+++ Digerido de biometanizacion	40, 80 y 80 ml/maceta	a los 4, 11 y 18 días del ensayo
Té de compost (TC)	20, 40 y 40 ml/maceta	a los 4, 11 y 18 días del ensayo
Compost como único material dentro de la maceta (CO)	-	al día 4 de ensayo
Testigo No abonado (T)	-	-

6.4.4. Determinación y cuantificación de biomasa

Durante el ciclo vegetativo del cultivo se llevó a cabo un seguimiento semanal. Las medidas principales de desarrollo vegetativo fueron las siguientes:

- a) Número de hojas por planta y crecimiento de cultivo (Figura 30)

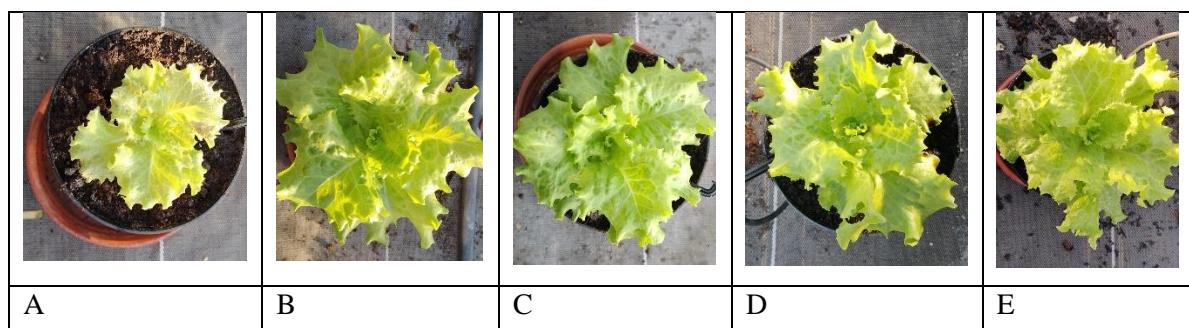


Figura 30. Crecimiento del cultivo de lechuga con los abonos aplicados. A. Lechuga testigo; B. Lechuga con digerido de la biometanización; C. Lechuga con mineral; D. Lechuga con té de compost; E. Lechuga con compost/turba.

- b) Peso seco. Se secaron las hojas en una estufa a 70 °C durante 72 horas (figura 34) y se pesaron posteriormente para poder expresar los resultados en gramos de lechuga por unidad plantación en función del rendimiento de los fertilizantes aplicados.

$$\%MS = [(peso inicial - peso seco) / peso inicial] \times 100$$

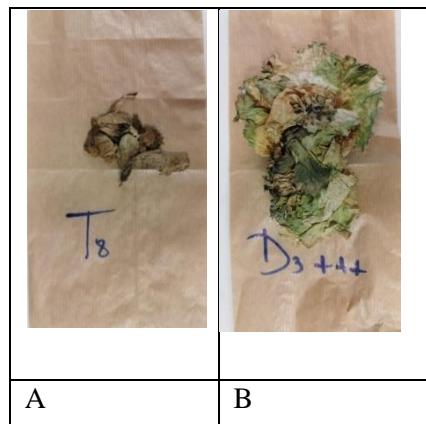


Figura 31. Determinación del peso seco de la lechuga luego del secado en estufa. A. Secado de lechuga testigo; B. Secado de lechuga alimentada con el digerido de la biometanización

6.5. Sistema de monitorización basado en el protocolo LoRaWAN

6.5.1. Selección de sensores y microcontroladores

El sistema de monitoreo basado en el protocolo de red de LoRaWAN ha monitoreado el proceso tanto a escala de laboratorio como a escala domiciliaria en la finca de prácticas de la UPNA durante el funcionamiento de ambos experimentos, obteniéndose el registro de los datos en tiempo real y las curvas de pH, temperatura, concentración de CO₂ del biogás para la determinación de fugas durante el cocinado y alertas de nivel de llenado durante la alimentación en “batch” del sustrato al biodigestor. Para la determinación de la concentración de biogás proveniente del gasómetro del biodigestor se realizaron análisis de CO₂ luego de un tiempo de fermentación de 25 días en tres momentos diferentes mediante un equipo analizador dióxido de carbono EXTENDAPAK® 6.0 antes de comenzar con las pruebas de quemado y cocinado con el CH₄ producido.

La elección de los sensores se basó en los parámetros críticos de control para los bioprocessos de digestión anaeróbica, así como la búsqueda de soluciones de bajo coste y fácil manejo adaptadas a los contextos humanitarios ofrecidas desde el IoT. El objetivo de la sensorización apuntó a control y monitoreo del proceso de biometanización para maximizar la eficiencia del bioprocreso y detectar perturbaciones del sistema que permitieran corregirlos de manera oportuna, así como dar estabilidad y garantías de seguridad a las personas responsables de la manipulación diaria del sistema.

La implantación del sistema de monitoreo y control del proceso, tanto en la fase previa de laboratorio como en la fase de escala domiciliaria en la finca de práctica de la UPNA, incorporó sensores de pH, temperatura, humedad, TVOC, CO₂ interno de baja concentración, CO₂ externo para la detección de fugas del sistema y detección de nivel de líquido con la finalidad de recoger los datos del proceso en tiempo real y monitorearlos y visualizarlos en la aplicación de IoT Cayenne myDevices (Cayenne, 2023). No se incluyó un sensor de CH₄ por el alto coste y la complejidad de su calibración. En su lugar, se incluyó un equipo analizador de CO₂ de alta concentración EXTENDAPAK® 6.0 para mediciones puntuales mediante una conexión directa a la válvula de biogás de la cocinilla. Cabe destacar que la medida de concentración de CH₄ se ha obtenido por diferencia de la medida de la concentración de CO₂ mediane este analizador. Se asume que su porcentaje es aproximado puesto que contiene pequeñas proporciones de otros gases como O₂, N₂ y H₂ que se pueden considerar despreciables.

Los sensores fueron acoplados a un microprocesador/placa Arduino Mega 2560 y una placa Arduino Things Uno basado en el Arduino Leonardo con un módulo Microchip LoRaWAN añadido (RN2483 y RN2903) mediante una conexión serial, configurando nodos encargados de realizar la lectura y trasmisir los paquetes de datos vía inalámbrica al Gateway LoRa, el cual se encargaba de transmitir los datos recibidos desde los nodos emisores hacia la base de datos, plataforma web y la aplicación móvil.

Los sensores y microcontroladores utilizados para el monitoreo y control del bioproceso se muestran en la figura 32. Los diagramas de conexión y códigos de programación de los sensores se encuentran en el anexo 1.

 <p>Arduino Things Uno (Leonardo)</p>	 <p>Sensor de temperatura para líquidos DS18B20</p>
 <p>Arduino Mega 2560</p>	 <p>Sensor de pH EN0169-V2</p>
 <p>Sensor electroquímico de CO₂ SEN0159</p>	 <p>Sensor de temperatura y humedad ambiente DHT22</p>



Figura 32. Sensores, microcontroladores y analizadores utilizados para el monitoreo y control del bioprocreso de digestión anaerobia

6.5.2 Programación

El diseño de monitorización para la mejora operativa del sistema de digestión anaeróbica se inició programando los sensores y módulos utilizando el software de código abierto Arduino IDE (entorno de desarrollo integrado) versión 2.2.1.

Se realizó la codificación y la configuración de 6 sensores bajo el lenguaje de programación C++ en dos módulos Arduino (Mega 2560 y Things Uno) mencionados en el apartado 6.5.1. La codificación de cada uno de los sensores de detalla en el Anexo 1. De manera simultánea, se creó una cuenta desde la plataforma de prototipado de dispositivos de IoT en Cayenne para configurar los módulos Arduino, monitorizar los sensores del IoT y visualizar los paquetes de datos históricos y en tiempo real. Se eligió esta plataforma porque se comunica cómodamente a través de una API MQTT y es compatible con redes LoRaWAN, lo que facilita el control y monitorización en remoto, así como la programación de alertas, avisos y el tratamiento de los datos emitidos desde los nodos. Se siguieron una serie de etapas para la configuración de los dispositivos en la plataforma Cayenne myDevices:

1. Instalación de las librerías Cayenne MQTT y CayenneLPP
2. Selección del módulo Arduino y puerto correcto.
3. Programación del código Arduino

4. Carga del código al módulo Arduino, verificación y compilación
5. Configuración de los dispositivos (nombre y parámetros)
6. Programación de los sensores y carga del código
7. Configuración del Widget
8. Importación de librerías y declaración de variables de operación
9. Configuración de la comunicación serial y modo de los pines
10. Comprobación de la recepción de datos
11. Configuración del canal y creación de un trigger (disparador de alerta)
12. Arranque de la plataforma y visualización de los datos de prueba

Las tablas 7 y 8 muestran la ubicación y las principales declaraciones de las variables de medición en los dos ensayos para cada uno de los sensores.

Tabla 7. Frecuencia de transmisión de datos y rangos operativos programados para los ensayos de laboratorio

Biodigestor laboratorio	Ubicación	Frecuencia de transmisión datos	Condiciones de operativas	Calibración
Sensor de temperatura para líquidos DS18B20	Dentro digestor	del 5min	0 - 125°C	-
Sensor de pH EN0169-V2	Dentro digestor	del 5min	0-14	Buffer 4 y 7
Sensor de calidad del aire CCS811	Dentro gasómetro	del 5min	CO ₂ : 400ppm~8.000ppm TVOC 0ppb~1100ppb	Línea de base (patrón aire limpio)
Sensor de nivel de líquido SEN0204	Fuera digestor (columna de agua)	del 5min	Tigger detección presencia agua nivel de agua	-

Tabla 8. Frecuencia de transmisión de datos y rangos operativos programados para los ensayos en la finca de prácticas.

Biodigestor HomeBiogás2.0	Ubicación	Frecuencia de transmisión de datos	Condiciones operativas	Calibración
Sensor de temperatura para líquidos DS18B20	Dentro digestor	del 30min	0 - 125°C	-
Sensor de pH EN0169-V2	Dentro digestor	del 30min	0-14	Buffer 4 y 7

Sensor electroquímico de CO₂ SEN0159	Fuera del gasómetro y en cocina (detección de fugas)	1min	≥ ppm	400~10.000	Línea de base (patrón aire limpio) y factor de corrección
Sensor de temperatura y humedad ambiente DHT22	Fuera del digestor y en cocina	1min	T° 0-80°C HR: 0-100%	-	
Sensor de nivel de líquido SEN0204	Fuera del digestor (tanque de digestión)	30min	Tigger por email. Detección nivel de líquido del digestor	-	

La figura 33 muestra algunas de las etapas de la configuración y programación del microcontrolador (Arduino) y de los sensores utilizados para el monitoreo y control del proceso de digestión anaerobia visualizados en la plataforma de Cayenne.

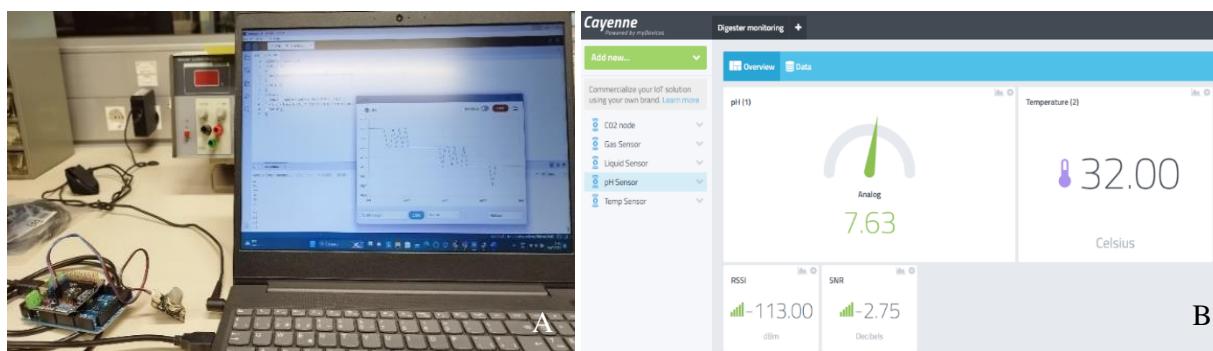


Figura 33. A. Declaración de variables y programación módulo Arduino y sensor CO₂; B. Visualización sensor de pH y temperatura en la aplicación de Cayenne

6.5.3 Implementación

La figura 34 muestra el diagrama de comunicación LoRaWAN que se estableció para realizar la monitorización de los datos del proceso de digestión anaerobia, tanto a escala de laboratorio como a escala domiciliaria en la finca de prácticas. En el caso del Biodigestor HomeBiogás2.0, se realizaron pruebas de transmisión y envío de paquetes de datos desde los nodos emisores al Geteway ubicado a 1.5km de distancia del campus universitario de Arrosadía (anexo 2) que a su vez transmitió los datos recibidos del nodo emisor vía conexión Wifi, hacia la base de datos para su visualización en la plataforma web y aplicación móvil de Cayenne. Se utilizaron tres nodos divididos en dos tipos de variables, a saber: variables del proceso interno y variables del entorno del proceso. El nodo 1: pH, Temperatura y CO₂ correspondió a las variables medidas dentro del proceso de biodigestión, mientras que el nodo 2: nivel de líquido y el nodo 3: CO₂, humedad y temperatura correspondieron a las variables medidas al exterior del biodigestor.

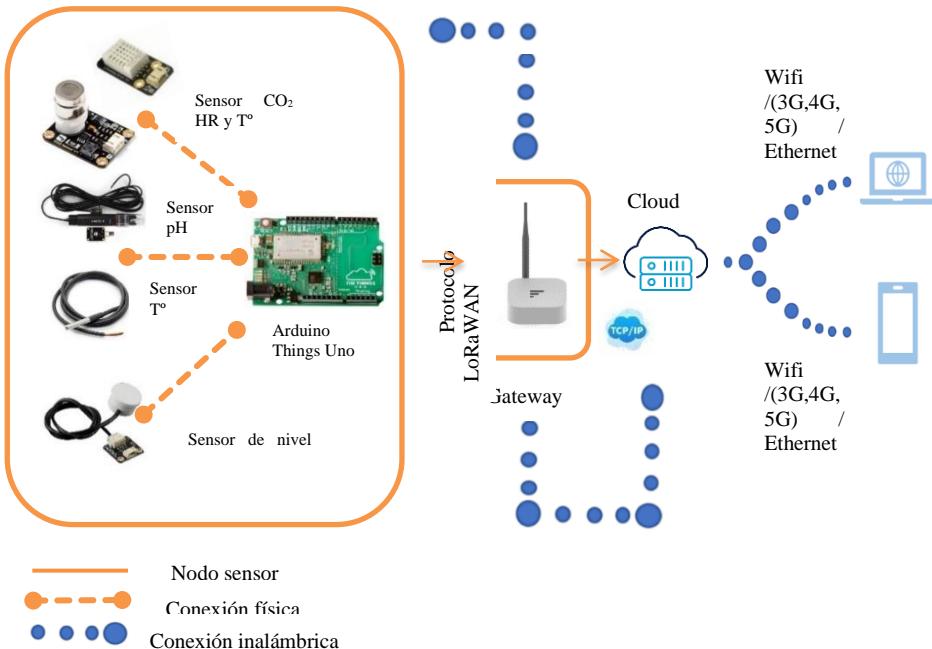


Figura 34. Diagrama de comunicación LoRaWAN implementando en el proceso de digestión anaeróbica con HomeBiogas2.0 y a escala de laboratorio (Adaptado de Silva Torres & Coello Hurtado, 2020)

El monitoreo y recopilación de los datos desde los dos ensayos de digestión anaerobia se realizó durante la toda la fase experimental. Para alimentación eléctrica de los Arduino/sensores se utilizaron baterías de una capacidad de 20.8Ah y de 2,5A y 2 puertos carga. En función de la frecuencia de transmisión de datos cada 30 minutos, se estimó una media de duración de las baterías de 5 días durante las pruebas de laboratorio.

Para evitar inferencias y fallos de transmisión debido al polvo, la lluvia, el viento y los insectos, los módulos Arduino y las baterías se cubrieron en cajas de conexión para proyectos eléctricos y posteriormente instalados en el biodigestor HomeBiogas2.0 (figura 35).

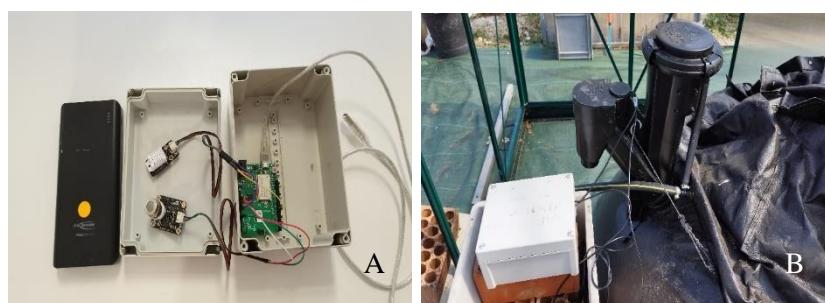


Figura 35. A. Caja de protección para Arduino, pines de conexión y batería; B. Caja de protección de Arduino y pines de conexión de los sensores de pH y T° en el biodigestor

6.6. Análisis de datos

Las herramientas estadísticas, programas y aplicaciones utilizados para la recopilación y análisis de resultados se detallan a continuación:

- a) Los códigos de programación para la configuración de las placas Arduino y los sensores de pH, temperatura, CO₂, humedad, y detección de nivel de líquido se han compilado con el software de código abierto Arduino IDE 2.2.1 para la transmisión de los paquetes de datos provenientes del proceso de biodigestión.
- b) La monitorización de los sensores, así como la visualización de los parámetros de operación y la recolección de los paquetes de datos históricos y en tiempo real se han obtenido a través de la aplicación en línea “Cayenne myDevices”.
- c) Los resultados obtenidos en el estudio del efecto de la temperatura, el pH y el tipo de sustrato sobre la producción de biogás se han analizado con Microsoft Excel estableciendo curvas de comportamiento temporal.
- d) Los resultados obtenidos en el estudio sobre el efecto de los distintos fertilizantes aplicados y la biomasa de cultivo de lechuga generada se han analizado con un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para valorar la existencia de diferencias significativas entre los distintos de tratamientos aplicado un test discriminador de medias Student-Newman-Keuls (SNK) con un $\alpha = 0,05$.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se presentarán los resultados relacionados con (i) la caracterización fisicoquímica de los sustratos utilizados, en segundo lugar (ii) la viabilidad técnica de la producción de biogás en sistemas de bajo coste y del uso del digestato como fertilizante y, a continuación, (iii) los resultados sobre el desarrollo del sistema de monitorización y control de los principales parámetros del proceso de digestión anaerobia usando tecnología LoRaWAN.

7.1 Caracterización de los inóculos y los residuos utilizados a escala de laboratorio

El inóculo empleado o Sustrato de Activación (SdA), como se ha indicado previamente, procede de estiércol de vacuno co-digerido de una planta de biometanización localizada en el valle del Ebro. La tabla 9 muestra los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de sustrato inoculado durante el proceso de biodigestión a escala de laboratorio.

Tabla 9. Caracterización del inóculo utilizado en el ensayo (H: Humedad; Sólidos Totales: ST)

Parámetro	Inóculo SdA (vacuno)
H (%)	59,30%
ST (%)	40,7%

El inóculo, como se ha indicado previamente, procede de estiércol de vacuno co-digerido de una planta de biometanización localizada en el valle del Ebro. El porcentaje de ST determinado en este ensayo está acorde con lo señalado por Varnero, (2011) y Vögeli et al., (2014) que indican rangos entre 13%-56% de ST para residuos animales bovinos.

7.2 Caracterización de los inóculos, las mezclas y sustratos utilizados en el digestor HomeBiogas2.0

Los diferentes sustratos y mezclas procedentes del digerido de la biometanización se caracterizaron desde el punto de vista físico-químico. Estos resultados marcaron las condiciones iniciales de la puesta en marcha del digestor y de los bioensayos de fertilización de cultivo señalados en el apartado 7.6.

Se utilizaron diferentes sustratos para alimentar el biodigestor, a saber: Sustrato de Activación (SdA), empleado para iniciar el proceso, y Sustrato de Estabilización (SdE), que también se introducía en el digestor en la fase de activación para enriquecer el medio con una concentración óptima de C/N y una vez el proceso se había estabilizado (es decir, al quemar el gas se obtenía una llama que se mantenía estable). A su vez, el origen de estos sustratos fue bien a partir del digestato procedente de estiércol de vacuno bien de purín de porcino. En la tabla 10 se presentan los resultados de las muestras durante la fase activación y estabilización del sistema, tanto al sustrato inoculado como al digerido generado de la biometanización. Como se puede observar, tanto los sustratos como la mezcla digerida presentaron valores de pH en torno a la neutralidad.

Tabla 10. Características fisicoquímicas de los diferentes sustratos y mezclas empleadas en el ensayo (Sólidos Totales; ST).

Día	Fase	Influyente Sustrato Inoculado	pH	ST (%)
1	Activación	SdA	7,5	66,53
8	Activación	SdA	7,5	51,66
16	Activación	SdE	7,5	7,84
Efluente Digerido				
7	Activación	SdA	7,5	0,95
15	Activación	Mezcla SdA + SdE	7,5	0,54
43	Estabilización	Mezcla SdA + SdE	7,5	0,44

La muestra del inoculo de vacuno (SdA) presenta un mayor contenido de ST (66,53% y 51,66%), mientras que la muestra de purín inoculado (SdE) presenta un menor contenido de ST (7,84%) debido a su procedencia: digestato generado tras un proceso de biometanización y purín de una granja de porcino en sistema intensivo, respectivamente.

En el caso del digestato se observa una clara disminución del porcentaje de ST debido por un lado a la descomposición de la materia orgánica por parte de las bacterias, y que se tradujo en la obtención de biogás reflejado en el apartado 7.5, y por otro, a que parte de los sólidos permanecen en el interior del digestor (lodos). Los valores de pH son cercanos a la neutralidad, lo que indica un nivel óptimo de la estabilización del sistema, así como un buen acondicionamiento de los microorganismos.

Como se mencionó en la sección 6.3.2, los análisis del influente y mostrados al en la tabla 10 (sustrato Inoculado) y del efluente (digestato) corresponden a análisis bajo diferentes condiciones y con distintos tipos de sustratos. Las muestras del sustrato inoculado se han determinado luego de someter los diferentes sustratos a 70°C durante de 96 horas hasta alcanzar un peso constante y el digerido a 105C° durante 24h como parte de los análisis gravimétricos. Por lo tanto, los resultados de la tabla 11 responden a la determinación de la fracción mineral. Se trata de una medida para cada momento con un análisis de

muestras en duplicados. De este modo, la tabla 11 presenta los datos de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) obtenidos del digerido por método gravimétrico. Los resultados indican la eliminación de los sólidos durante el proceso de biometanización y que podrían indicar el nivel de biodegradabilidad de la materia orgánica. Cabe destacar que los SV determinan la cantidad de materia orgánica disponible para las bacterias durante la producción de biogás.

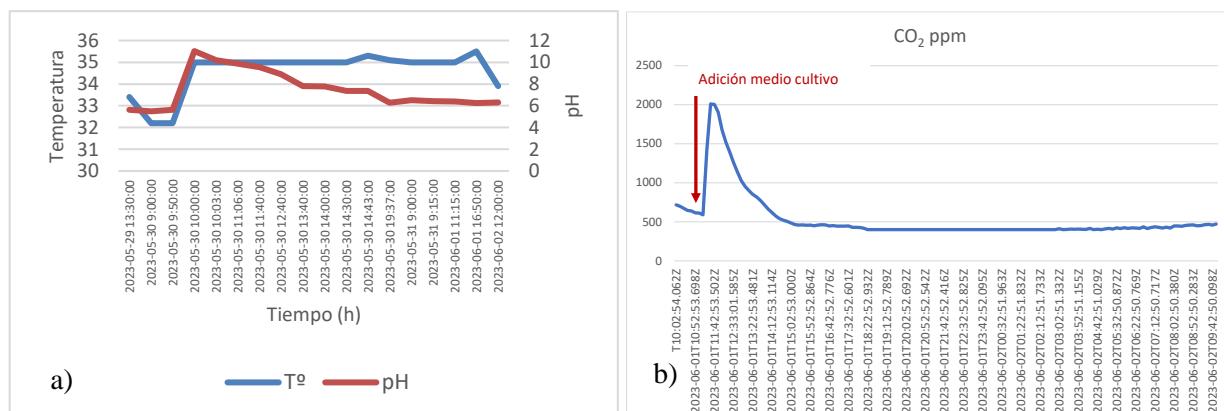
Tabla 11. Características fisicoquímicas del sustrato digerido (Sólidos Totales; ST; Sólidos Volátiles: SV; SdA: Sustrato de Activación; SdE: Sustrato de Estabilización).

Día	Fase	Efluente Digerido	\bar{X} ST (g/L)	\bar{X} SV (g/L)
7	Activación	SdA	9,45	6,41
15	Activación	Mezcla SdA + SdE	5,44	3,14
43	Estabilización	Mezcla SdA + SdE	4,36	2,12

7.3 Producción de gas y monitoreo parámetros en el digestor a escala de laboratorio

Durante el ensayo de laboratorio se monitorizaron distintos parámetros de control del proceso como el pH, la temperatura y la producción de CO₂. La figura 36 muestra la evolución del pH, la temperatura y los niveles de CO₂ presentes en el biogás durante el periodo de experimentación en el digestor anaerobio con los sustratos utilizados y cuya composición y caracterización se muestra en la tabla 5 y la tabla 9; los datos recogidos por los sensores fueron registrados en la aplicación Cayenne a partir de los paquetes datos entregados por el sistema de sensorización de la red LoRaWAN.

El ensayo ha mostrado el efecto de la temperatura y el pH sobre la generación de biogás. A nivel del tipo de sustrato utilizado, se puede observar en la figura 36a un periodo corto de acidificación del sistema, debido probablemente al efecto de la leche empleada como sustrato sobre la actividad bacteriana, y que fue corregida con una solución alternada de NaOH 10N y de HCl 5N para estabilizar el proceso. Respecto de los efectos del sustrato BHI Broth (brain heart infusion) sobre los niveles de CO₂ en el biogás (figura 36b), se puede apreciar un aumento significativo de los niveles de CO₂ presentes en el digestor, con una estabilización posterior debido probablemente al agotamiento de los nutrientes disponibles, así como de la actividad microbiana.



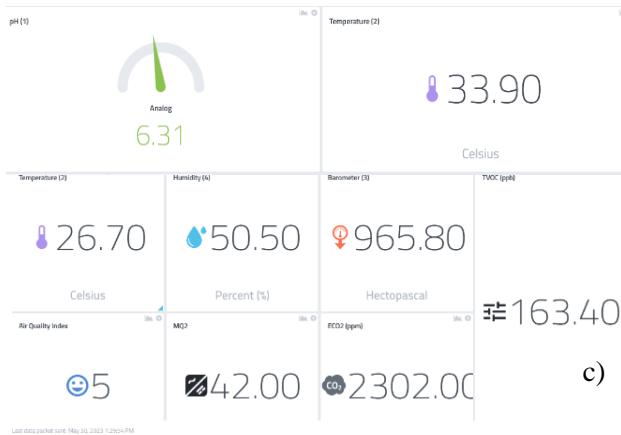


Figura 36. Evolución del pH y la temperatura (a) y el CO₂ (b) durante el proceso de digestión anaeróbica a escala de laboratorio y visualización de los parámetros entregados por los sensores en Cayenne (c)

7.4 Producción de biogás y monitoreo de parámetros del digestor HomeBiogas2.0

En cuanto a la producción de biogás en el digestor a pequeña escala empleado, y en general, durante todo el periodo de experimentación tanto la temperatura como el pH se mantuvieron estables y en los rangos esperados que favorecen la digestión anaeróbica y propios de un régimen mesófilo de operación, a saber: entre temperaturas de 25° y 35°C, y pH entre 7.2 y 7.6. Estos rangos concuerdan con lo señalado por Varnero, (2011) de temperaturas óptimas entre 25° y 35°C y de rangos de pH entre 6.8 y 7.4.

Cómo se puede observar en la figura 37a a partir de los datos extraídos por el sistema de telemedida y sensorización en el interior del biodigestor, la producción máxima de biogás se alcanza al día 25 de operación. La aparición de biogás hasta su volumen nominal de producción máxima (700L) coincide con el periodo de tiempo establecido para este modelo de digestor, es decir, a la tercera semana de funcionamiento. Los resultados obtenidos a partir de los análisis gravimétricos del digerido de la biometanización (efluente) indican una remoción progresiva de los sólidos SV hasta los 2,12g/l entre la semana 1 y 6 de operación, lo que indica la asimilación de los nutrientes por parte de las bacterias producto de biodegradación de la materia orgánica y la aparición de biogás (figura 37b). La cinética de biodegradación de la materia orgánica contenida en el sustrato a lo largo del tiempo de digestión desciende de manera pronunciada hasta la tercera semana de funcionamiento donde se alcanza la máxima producción de biogás del proceso.

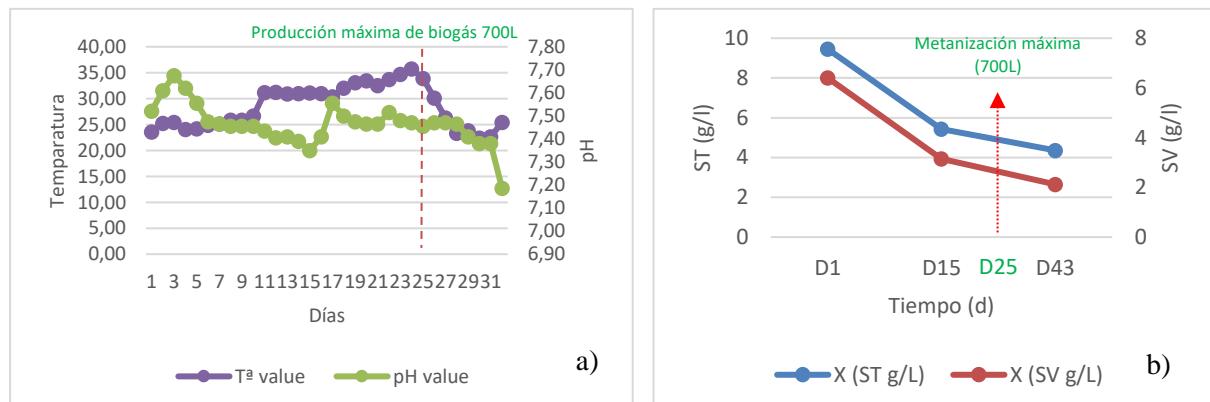




Figura 37. Evolución del pH y la temperatura (a), sólidos totales y sólidos volátiles del efluente (b) durante el proceso de digestión anaeróbica y aspecto del gasómetro con producción mínima y máxima de biogás (c)

Por otro lado, las concentraciones del CO₂ liberado desde el proceso de biodigestión coinciden con los valores señalados por Li et al., (2019) que indica rangos de concentración de dióxido de carbono entre 25-50% y con el volumen máximo observado durante la descomposición de la fracción orgánica animal desde el sustrato inoculado de vacuno y el purín de cerdo. La figura 38 también muestra la variación de temperatura respecto del día del arranque del proceso hasta la primera metanización. Este incremento podría tener una relación con la producción máxima de biogás.

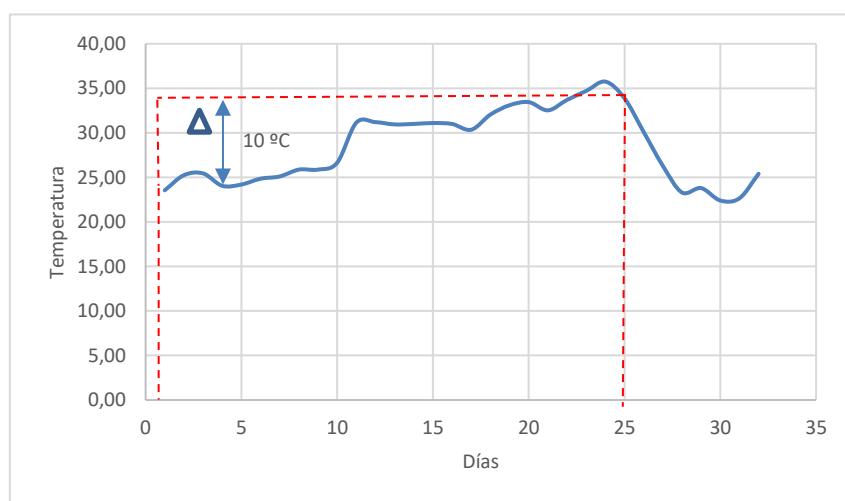


Figura 38. Variación de temperatura durante la generación de biogás

Se midió la proporción de CO₂ en los días 1, 2 y 3 (figura 39). Las medidas correspondieron a días correlativos tres días después de generada la primera metanización, es decir, el primer llenado completo del gasómetro, dando unos valores de 34-35%. A partir de estos valores y por diferencia se ha estimado la proporción de metano, asumiendo que las proporciones de otros gases como O₂, N₂ y SH₂ son pequeñas y pueden obviarse. Por lo tanto, la proporción de metano obtenido en el biogás sería del orden de 65-66%

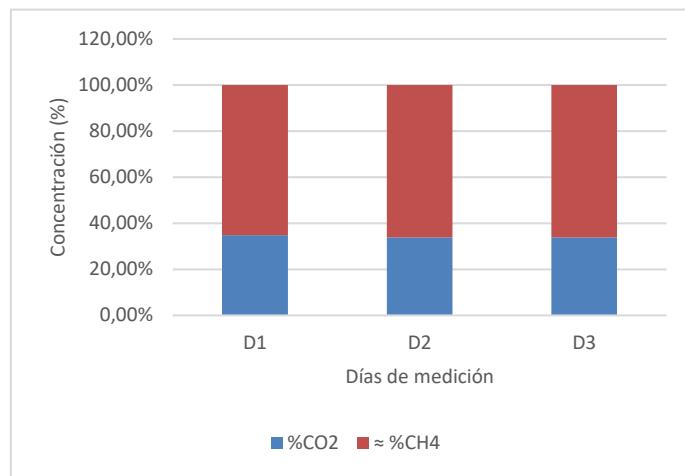


Figura 39. Concentración de CO₂ y de CH₄ presente en el biogás medido por medio de un detector de CO₂ de alta concentración EXTENDAPAK® 6.0

7.5 Producción de biogás para el cocinado y monitoreo de fugas de CO₂

Los datos sintetizados en la tabla 12 muestran el volumen de biogás producido en función del tipo de sustrato utilizado durante la fase de activación y la fase de funcionamiento rutinario (figura 23). Los resultados muestran una producción estable de biogás posterior a la semana 6 de funcionamiento inoculando biorresiduos, probablemente, por una relación optima de C/N de la materia prima fresca utilizada para iniciar la digestión anaeróbica. Si bien la producción de biogás depende también del pH, la temperatura y la agitación, se puede observar una óptima estabilización del sistema relacionado con la reducción del tiempo de respuesta del proceso de digestión para alcanzar el volumen máximo de biogás en el gasómetro. Los volúmenes de biogás producidos se encuentran en consonancia con lo reportado por Alexander et al., (2019) que indica que se producen alrededor de 575 y 690 L de biogás por cada 5 y 6 kg de biorresiduos usando el mismo sistema en contextos periurbanos.

Tabla 12. Producción volumétrica de biogás con los sustratos utilizados

Día	Sustrato inoculado	Tiempo (d)	T ^a media ambiental (°C)	pH	Cantidad MS (kg)	Fase	Volumen Biogás (L)
25	Mezcla SdA + SdE	25	22	7,5	39	Activación	700
46	SdE	8	19,2	7,5	7,8	Rutinario	680
59	B1 biorresiduo	4	20	7,5	5	Rutinario	700
98	B2 biorresiduo	1	14,5	7,5	4,5	Rutinario	680

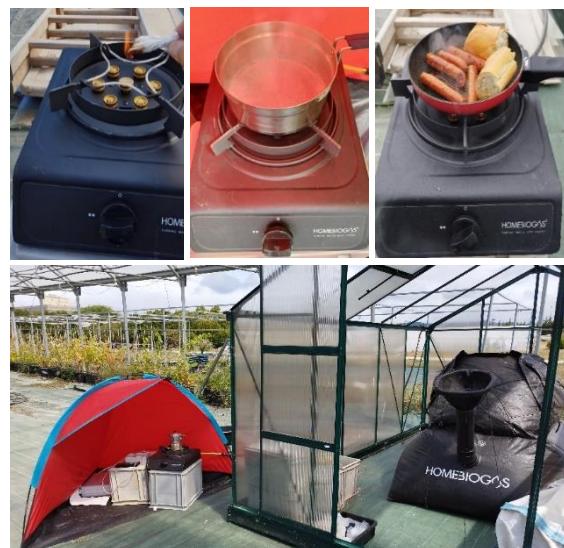


Figura 40. Pruebas de cocinado con distintos tipos de alimentos

Por otro lado, una vez alcanzado el volumen máximo y una producción constante de biogás, se establecieron 3 pruebas de cocinado (figura 40) a fuego alto para evaluar el tiempo cocinado y estimar la efectividad del poder calorífico del biogás en la cocción de alimentos. La tabla 12 muestra los resultados del tiempo cocción de distintos alimentos utilizando biogás para cocinar. En el caso de la cocción del embutido, se utilizó el 100% de biogás generado con el objetivo de determinar el tiempo de producción de biogás después de inocular con biorresiduos según la tabla anterior (tabla 12).

Tabla 13. Pruebas de cocinado (P): cantidad de alimento y tiempos de cocinado para distintos tipos de preparación de alimentos

	Alimento	Cantidad ml/g	Tiempo cocción (min)	Volumen Biogás utilizado (L)	T^a exterior (C°)	%HR exterior
P1	Café (cafetera)	150	4	35	22	57
P2	Agua (cazuela)	400	10	87	26	51
P3	Producto cárnico (sartén)	400	80	700	27	-

Finalmente, durante la preparación de alimentos simulando un cocinado en un contexto campo de refugiados, las emisiones CO₂ tuvieron una media de 585ppm. (figura 41). Las concentraciones de este gas se mantuvieron dentro de lo esperado y acorde a las condiciones en el ámbito del uso de cocinas domésticas y de protección de la salud humana de acuerdo con lo menciona por Rojas et al., (2021), en el cual se indican valores < 600 ppm y un valor de límite máximo de 2.500ppm. También es destacable que, en relación con las concentraciones de CO₂ en las llaves de paso del biogás, no se detectaron fugas.

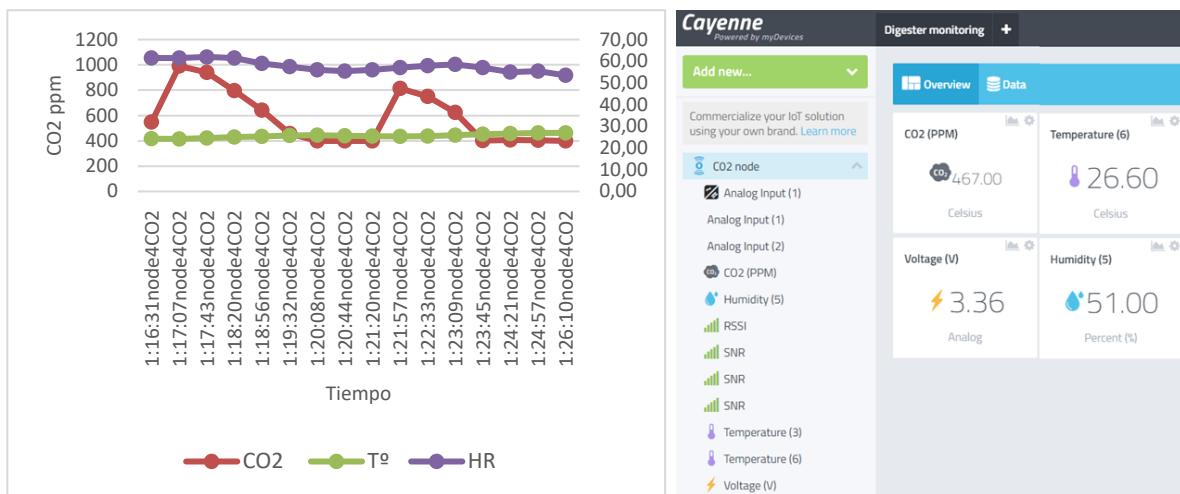


Figura 41. Emisiones de CO₂ durante el cocinado de alimentos

Los resultados muestran que el uso del sustrato animal y de biorresiduos en la alimentación tiene una producción volumétrica de biogás variable. Si bien, la producción de biogás tendió a aumentar cuanto mayor era la cantidad de sustrato presente en el biodigestor, las diferencias en el rendimiento volumétrico de biogás dependieron de la fase y del tipo y cantidad de sustrato inoculado. El biorresiduo mostró mejor rendimiento volumétrico en la fase de funcionamiento rutinario ya que con una menor cantidad de sustrato se obtenía el volumen máximo de llenado de biogás (700L) en un periodo de entre 1 a 4 días luego de la adición de sustrato, probablemente por su mayor contenido de proteínas e hidratos de carbono en comparación con el estiércol animal, ya que enriquece el medio con una relación de C/N más balanceada, más cercana a 30, y que por lo tanto favorece el proceso de metanogénesis. Lo anterior también se traduce en una mejora en las condiciones de cocinado, puesto que el nivel aproximado de CH₄ aumenta hasta un %66.

7.6 Bioensayo de crecimiento vegetal

7.6.1. Número de hojas

La recolección de los datos se realizó durante un periodo de 30 días después del trasplante, tiempo durante el que se registró el número de hojas por planta. La figura 42a muestra la perspectiva visual del crecimiento del cultivo en cuatro días diferentes (día 7, 13, 18, 25), mientras que la figura 42b muestra la evolución de la cantidad de hojas durante seis visitas de observación dentro de los 30 días que duró el bioensayo. El número de hojas comienza a diferenciarse desde el día 25, donde las plantas que recibieron el digestato biometanizado (+++), el fertilizante mineral, el compost y té de compost presentaron 9, 8 y 7 hojas respectivamente, frente a las 5 hojas del testigo. Cabe destacar que las lechugas fertilizadas con té de compost y con el digestato biometanizado (+), dan resultados inferiores, en cuanto al número de hojas, al resto de fertilizantes; en cambio, las lechugas abonadas con el digestato biometanizado (++) y mineral alcanzan sus valores más altos entre el día 25 y el día 30 llegando a coincidir.

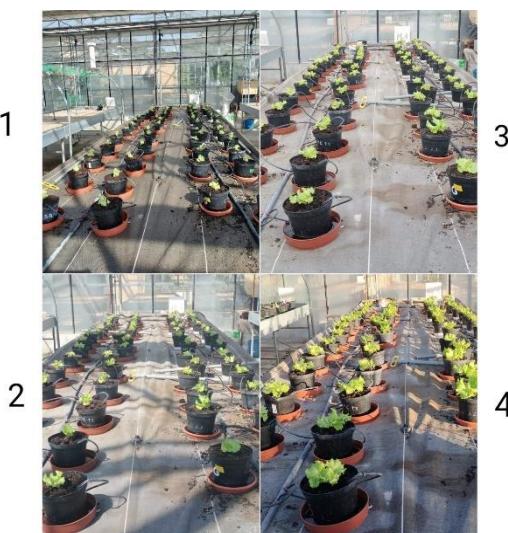


Figura 42a. Perspectiva visual del crecimiento del cultivo.

1. Día 7; 2. Día 13; 3. Día 18; 4. Día 25

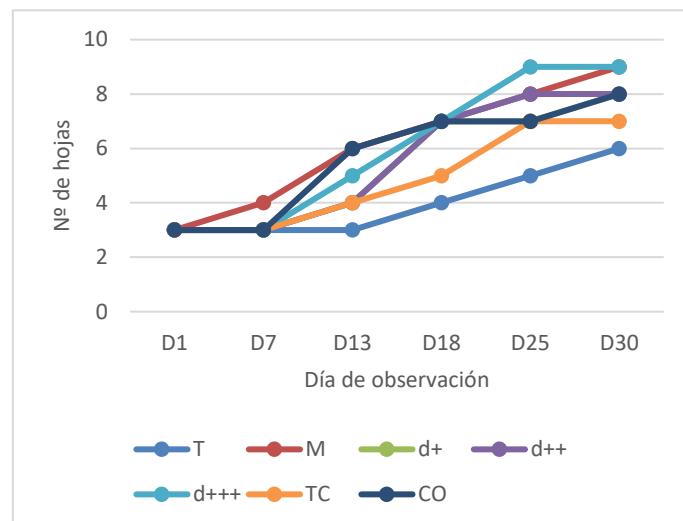


Figura 42b. Evolución del número de hojas según tipo de abono. T: testigo; M: abono mineral; d+: digerido de biometanización; d++: digerido de biometanización; d+++: digerido de biometanización; TC: Té de compost; CO: Compost

7.6.2. Biomasa y peso seco

Para el análisis de los datos de la biomasa de lechuga se extrajo la parte aérea de las plantas y se pesó. Se pudieron observar diferencias entre los distintos abonos aplicado (figura 43), de forma que el tratamiento con la media más alta fue el digestato biometanizado (+++), seguido por el abono mineral ($p<0,05$). Al contrario, el tratamiento testigo y el digestato biometanizado (+) presentaron una media inferior ($p<0,05$). En ese sentido, se aprecia que el tratamiento testigo y el digestato biometanizado (+), son los que menor cantidad de biomasa seca han originado. El peso seco de las lechugas abonadas con digestato biometanizado (++), compost y té de compost presentan rendimientos similares, mientras que el digestato biometanizado (++) y el abono mineral son los que mayor biomasa han generado. Con estos resultados se puede constatar que, a mayor dosis de digestato, mayor es la biomasa del cultivo.

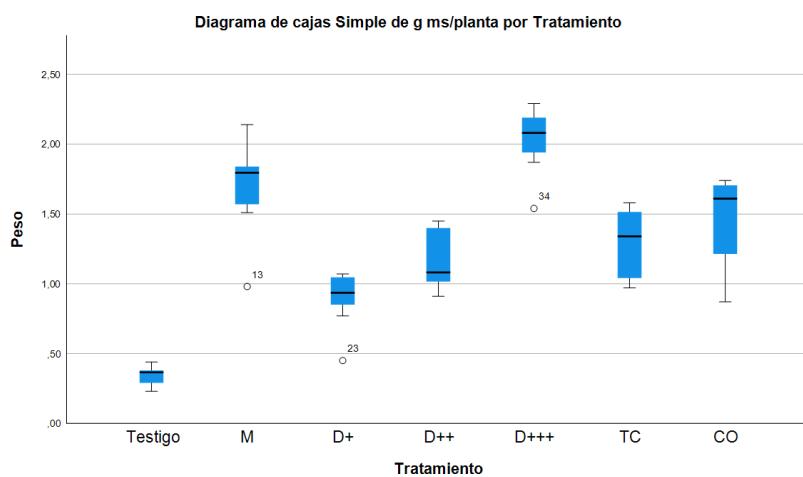


Figura 43. Peso de seco del bioensayo de lechuga según tipo de abono

En cuanto a la capacidad fertilizante del digestato, el aumento del tiempo de residencia en 17 días del sustrato dentro del digestor (sin alimentación) luego de la primera metanización, fue suficiente para demostrar la efectividad del digerido, tanto en el aumento de la biomasa del cultivo, como en el número de hojas de lechuga. Dosis de 80ml de digerido metanizado, demostraron la posibilidad de utilizar biofertilizantes en extensiones agrícolas que requieren altos contenidos de N y K. Queda por corroborar si el digerido obtenido desde la biometanización de los biorresiduos provenientes del comedor central de central de la UPNA aumenta su calidad como fertilizante.

7.7 Sensorización

7.7.1 Detección del nivel de llenado del biodigestor

Se utilizaron sensores que detectan la subida del nivel de líquido en el digestor para conformar el sistema de alerta. Así, los sensores envían una alerta de seguridad vía correo electrónico cada 30min, de acuerdo con la frecuencia de transmisión de datos programados con el software Arduino IDE (tabla 7) y con reflejo en la plataforma de Cayenne.

De esta forma se puede controlar el nivel de llenado tras la adición de sustrato y corregirlo en el caso de que sea necesario. La figura 44 muestra el funcionamiento del sistema de alerta debido a la subida del nivel de líquido en el digestor tras la adición de un lote de sustrato. En general, se observó que este sensor presenta un alto nivel de sensibilidad que permite un monitoreo constante del nivel de llenado y sin interferencias.

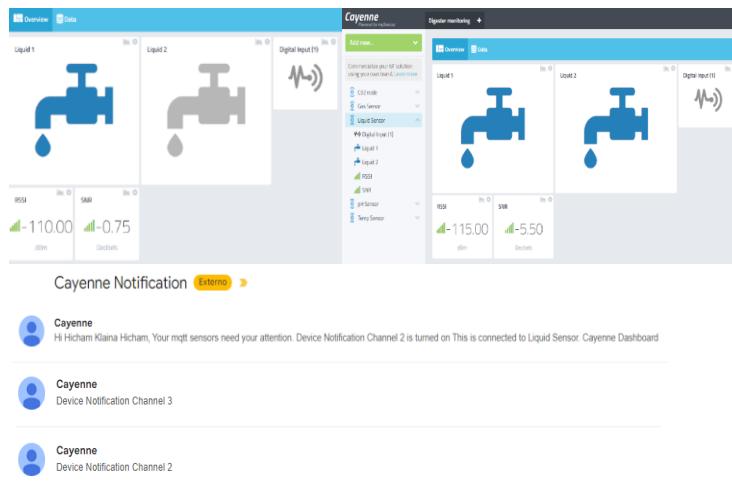


Figura 44. Monitoreo y alerta del nivel de llenado del biodigestor

7.7.2 Detección del CO₂ durante el cocinado y por fugas del sistema

Como se mencionó en el apartado 7.5, se realizaron tres pruebas de cocinado de alimentos. Para ello, se utilizaron sensores para detectar las emisiones de CO₂ durante el cocinado de alimentos, así como para detectar eventuales fugas del sistema de biodigestión. De esta manera, se pueden detectar los niveles de emisiones de gas en el ambiente y evitar su exposición ante potenciales efectos dañinos a la salud de las personas. Del mismo modo, se puede controlar la apertura de la manilla encendido de la cocinilla y cerrarla en caso en caso de que quede accidentalmente abierta. En cuanto a las llaves de paso de biogás, se pudo constatar la ausencia de fugas, como se puede apreciar en la figura 45.

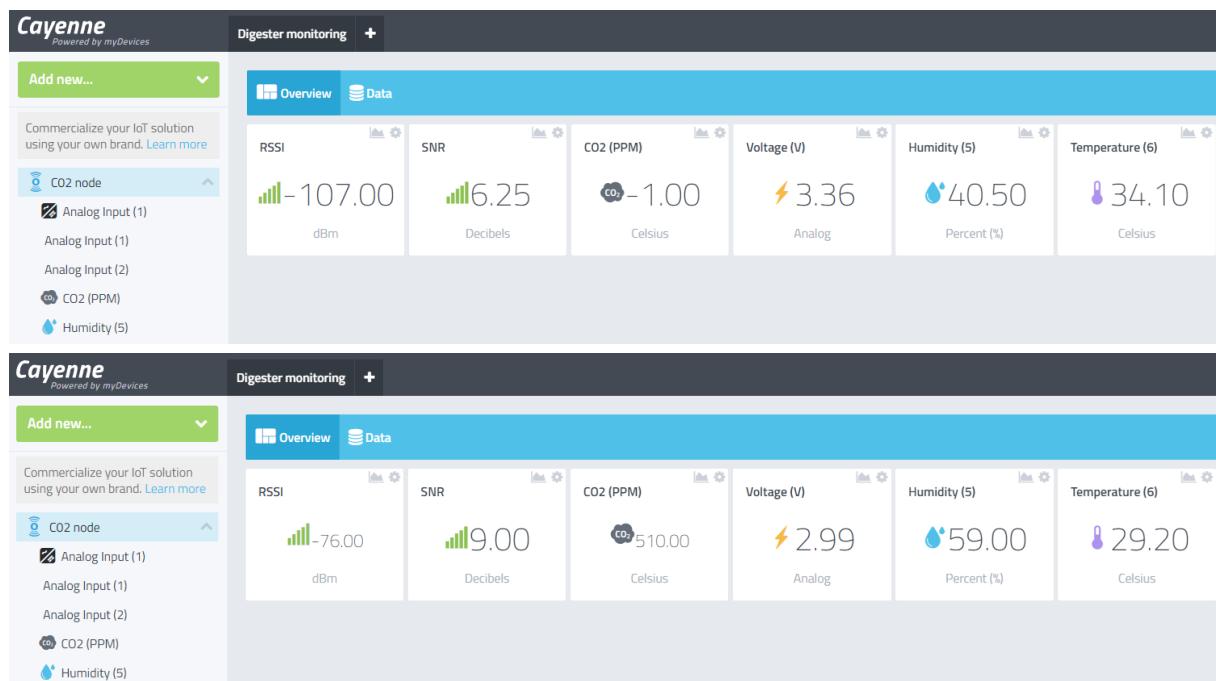


Figura 45. Monitoreo de CO₂ y fugas de biogás del sistema

7.7.3 Monitoreo de Temperatura y pH

Se utilizaron sensores de temperatura y pH dentro del digestor para garantizar homogeneidad del sistema, puesto que los procesos anaerobios son fuertemente dependientes de la temperatura y de pequeños cambios en los niveles de pH. De esta manera, se pueden controlar las variaciones de temperatura y pH tras cambios de drásticos de la temperatura ambiente o de la adición de sustrato y corregirlo para mantener la estabilización del bioproceso en todo momento. Los sensores entregaron lecturas precisas y constantes, sin llegar a tener grandes variaciones que pudieran alertar acciones de corrección el sistema (figura 46).

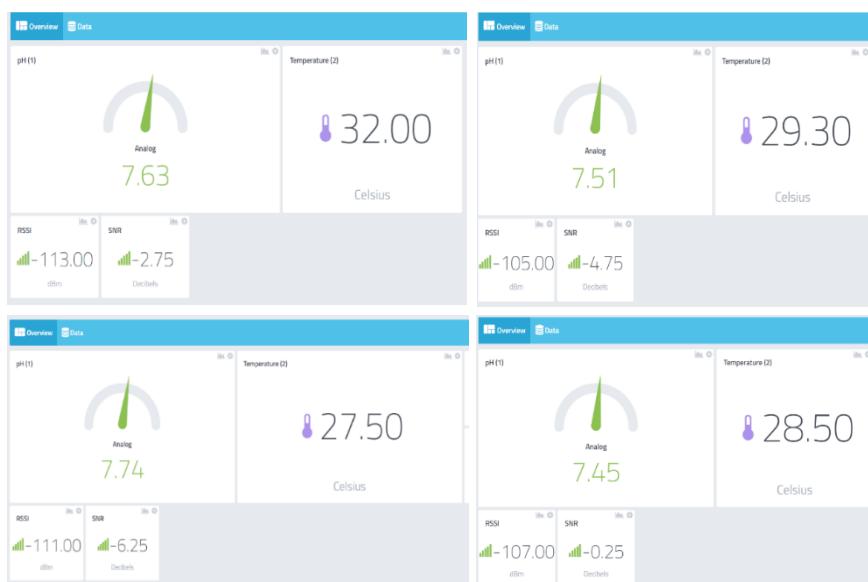


Figura 46. Monitoreo y lecturas de pH y temperatura durante la fase de activación del digestor

7.8 Aplicación del biodigestor a contextos humanitarios y posibilidad de escalado

Respondiendo a las preguntas de investigación 1 y 2 del objetivo 1, la realización de este proyecto de investigación puede demostrar la aplicabilidad del sistema a los contextos humanitarios, especialmente en zonas donde la ganadería y la agricultura es principal medio de vida de las personas y familias refugiadas, cumpliendo además con los principios de la economía circular y con los ODS 7, 12 y 13.

Solo en África, más del 60% de la población económicamente activa trabaja en sector agrícola, por lo tanto, existe una alta probabilidad de encontrar los sustratos y biorresiduos adecuados para la biodigestión de la materia orgánica. En cualquier caso, aunque exista disponibilidad de estos sustratos, las mejoras asociadas a la gestión de los biorresiduos pueden pasar por el uso de técnicas artesanales de pretratamiento del sustrato (físicos y térmicos) para mejorar la biometanización, como la segregación y el tamizado de residuos, con la finalidad de limpiar el sustrato de posibles impurezas que podrían dañar el proceso de biodigestión.

Las pruebas experimentales demuestran un funcionamiento óptimo para el modelo de biodigestor utilizado. Aunque las recomendaciones del fabricante especifican que la temperatura media del sistema durante el día y la noche debe ser de al menos 25°C durante las primeras 4 semanas de la puesta en marcha, los ensayos realizados apuntan a que la temperatura óptima para la generación de biogás producto de la digestión anaerobia se ha situado entre los 30°C y 35°C. Cabe destacar que luego de las 3 semanas de puesta en marcha del sistema, se ha podido generar biogás incluso a temperaturas inferiores a la media de 25°C. Esto conduce a pensar que la viabilidad técnica de producción de biogás a pequeña y mediana escala para la promoción de cocinas limpias en contextos humanitarios sería posible dada la similitud de las condiciones estacionales en las cuales se han llevado a cabo los ensayos. La fase experimental se desarrolló en el periodo estival, cuando las condiciones ambientales de la zona del ensayo pueden asemejarse a las de algunos países de África y Asia como Zimbabue, Ruanda, Kenia, Malawi, República Democrática del Congo, Myanmar, Tailandia o Bangladesh, que acogen miles de personas en diversos campos de refugiados y desplazados. Todos estos países mantienen condiciones climatológicas que resultan óptimas, en cuanto a la temperatura, ante eventuales instalaciones de digestores anaerobios por ser lugares cálidos y soleados que ayudan a mejorar la cinética de la digestión y la producción de biogás que podrá ser empleado como energía térmica para cocinar. Bajo estas condiciones, es más probable que las unidades de biogás alcancen un rendimiento óptimo.

Además, desde el punto de vista de los costes de inversión (CAPEX), un biodigestor de este tipo con una capacidad nominal de 2m³ bordea los 800€, lo que lo convierte este sistema en una solución de bajo coste, adaptable al uso unifamiliar y que podría revertir, además, en contextos rurales y periurbanos, en un aumento de las cosechas agrícolas al utilizar el digerido como biofertilizante (subproducto) de la digestión anaerobia. Cabe destacar, que el diseño de este digestor permite el montaje de partes y piezas como una letrina (inodoro) para canalizar las excretas humanas o la canalización del digerido a un jardín o extensión agrícola de drenaje subterráneo. En relación con los costes operativos (OPEX), este tipo de biodigestor requiere de un mantenimiento sencillo, siendo necesario únicamente una persona a tiempo parcial para alimentarlo y realizar una inspección visual del gasómetro y las válvulas gas.

Desde el punto de la producción biogás para cocinar, esta solución representa una ventaja respecto al uso de energía eléctrica para cocinar, puesto que, en general, la red eléctrica es un punto muy débil en los campos de refugiados y la única manera de obtenerla es mediante generadores eléctricos adoptando vías poco sostenibles de generación energía por el consumo de combustibles como la gasolina. Del mismo modo, y como se ha visto en este trabajo, el uso de leña para cocinar puede causar un fuerte impacto medioambiental y sobre la salud de las personas refugiadas y desplazadas, además que es un

recurso cada vez más escaso en los campos de refugiados con un potencial riesgo de conflicto con la comunidad de acogida debido a la competencia de recursos. Por último, la exploración y evaluación de este tipo de biodigestores en instalaciones unifamiliares y comunales podrían ayudar a disminuir los niveles de violencia basada en género producto de la recolección de leña, así como la brecha de género existente en la división de trabajo al crear un modelo de gestión basados en el suministro de residuos y la apertura de una vía de negocio desde el valor económico que podrían tener los residuos en la generación de ingresos para las familias mediante emprendimientos como restaurantes, teterías, cafeterías, etc.

Desde la óptica de un “plan de negocios circular” en contextos de campos de refugiados, este estudio abre la posibilidad de explorar el potencial económico de la compra y venta de sustratos y biorresiduos para la alimentación del biodigestor. Este factor es crítico para el funcionamiento del biodigestor. Del mismo modo, se puede extender a la compra y venta del biofertilizante para apoyar los procesos de agricultura familiar de la comunidad de acogida.

7.9 Oportunidades de digitalización de procesos

Dando respuesta a la pregunta de investigación 3 del objetivo 2 del presente trabajo, durante la investigación se ha podido corroborar la gran versatilidad de los Arduino/sensores como una vía óptima para el control y monitoreo de los diferentes de parámetros del proceso de digestión anaeróbica, dado su bajo coste y bajo consumo de energía. Con un coste operacional que bordeó los 500€, se pudieron recolectar datos desde múltiples variables con una gran precisión y una distancia de transmisión significativa. El uso de este tipo de herramientas de transmisión y telemedida tiene un gran potencial para la medición los parámetros fisicoquímicos tradicionales y el análisis de muestras, alejándose de equipamientos tradicionales más costosos como la espectroscopía, la cromatografía o la termogravimetría que además implican la realización de análisis en laboratorio. Todo esto en su conjunto representa ventajas y beneficios especialmente interesantes dentro de los proyectos de acción humanitaria en campos de refugiados, puesto que el financiamiento es limitado y el factor de la distancia se aminora de modo considerable pensando en la ubicación de las oficinas de las ONGs que apoyan las zonas donde se encuentran los campos, muchas veces, distantes de los proyectos. Cabe señalar que el monitoreo de los datos del proceso a distancia también podría representar un ahorro importante de tiempo y de los costes asociados al desplazamiento a los campos, optimizando los recursos materiales y humanos de las ONGs, además de reducir la huella de carbono de las intervenciones de humanitarias.

Por otro lado, la experimentación ha demostrado que esta alternativa supone una oportunidad real para mejorar la gestión y eficiencia del proceso, dada la simplicidad de la programación de sus componentes y la adquisición de paquetes de datos en tiempo real que pueden ser consultados y visualizados mediante paneles (dashboards) desde un ordenador, Tablet o dispositivo móvil desde cualquier parte del mundo. Esto permite gestionar la información para la toma de decisiones o actuar en caso de caso de fallos como la reparación del sistema, la fuga de gases o la prevención de eventuales daños a causa de cambios bruscos de los parámetros ambientales. Esto facilitaría mucho el acompañamiento técnico de las ONGs para la implementación de este tipo de proyectos, sobre todo, durante la puesta en marcha, ya que también son estructuras digitales podrían ser comprendidas fácilmente por el personal de las ONGs y por la población refugiada y que ayudarían a desmantelar los prejuicios y la resistencia sobre la adopción y uso de tecnologías comunicación supuestamente “complejas”.

Si bien la aplicación de esta solución fue estudiada en un contexto experimental en el norte de España para el tratamiento residuos animales y urbanos, esta solución posee un gran potencial en su aplicabilidad en campos de refugiados dada la multiplicidad de proyectos de cooperación internacional

que existen con enfoque en medios de vida, desarrollo productivo y seguridad alimentaria en zonas rurales y periurbanas. Además, el contexto experimental estuvo marcado por el periodo estival, lo que también constituye un buen indicador operacional en función de la climatología presente en los países donde están instalados los campos.

Por último, cabe destacar, que, para conferir aún más autonomía al sistema, sería necesario hacer uso de otras energías renovables como la fotovoltaica para alimentar la energía de las baterías que forman parte de la red LoRa.

7.10. Identificación de retos y oportunidades

La investigación llevada a cabo ha permitido también a identificar distintos retos de futuro y oportunidades, sobre todo considerando el escalado a contextos humanitarios, como los mencionados a continuación:

- No es común encontrar estudios sobre la digitalización de infraestructuras aplicadas a proyectos de biodigestores anaerobios en campos de refugiados y desplazados, por lo tanto, el paso siguiente sería testear el modelo en un campo, bien sea a escala comunitaria o unifamiliar y observar la evolución del sistema.
- Una vez instalado el sistema de conectividad, la digitalización de la infraestructura se puede aprovechar para incorporar otros elementos de sensorización colaterales al sistema, por ejemplo, el envío de datos ambientales de la zona, sistema de alertas de bajo ancho de banda, etc.
- Los sensores empleados en esta investigación son simples, y han sido escogidos para llevar a cabo la validación del sistema, por lo que es necesario considerar sensores preparados para poder operar en entornos difíciles y complejos. Del mismo modo, sería necesaria la instalación de una puerta de enlace o “Gateway” preparada para la intemperie.
- Sería importante considerar parámetros fisicoquímicos que requieren sensores o sistemas de medición más complejos como ST, AGV, DBO o DQO.
- Los sensores de gases CO₂ y CH₄ suelen medir a bajas concentraciones y solo podrían ser utilizados para mediciones de fugas y emisiones en interiores y exteriores con un rango muy acotado. Además, requieren de calibraciones más complejas y algunos detectan más un tipo de gas, lo que podría dar lecturas poco fiables. Para la medición de biogás a altas concentraciones y, en particular, de metano, se requieren sensores más costosos o equipos analizadores de un amplio espectro de concentración.
- Podría plantearse el uso de otras energías renovables como la fotovoltaica para alimentar la energía de las baterías que forman parte de la red LoRa dada la ausencia de una red eléctrica en algunos contextos.
- Se debe garantizar una disponibilidad suficiente de residuos y agua para el funcionamiento del biodigestor. Esto es crucial para el proceso. Por ejemplo, deberían tenerse en cuenta los niveles de actividad los proyectos agropecuarios de cooperación internacional en los campos, en particular, la disponibilidad de animales de las personas refugiadas y el apoyo de los ganaderos de la comunidad de acogida. Del mismo modo, habría que contar con la posibilidad de acceder a reservorios de agua en caso de sequías muy prolongadas.
- Ante un posible escalamiento o aplicación, deben evaluarse aspectos como el sistema de gestión de residuos (recogida, limpieza y suministro) y la aceptación social y cultural de la comunidad en relación con la manipulación y el tratamiento.

- Habría que explorar la posibilidad de generar actividades generadoras de ingresos mediante la compra y venta de fertilizante y de residuos en reemplazo de la leña como combustible para cocinar. Del mismo modo, la creación de pequeños negocios como restaurantes con biodigestores de mayor volumen utilizando *HomeBiogas 7* de una capacidad de 2.5m³ de biogás y que podría suministrar hasta 6 horas diarias de cocinado.
- Sería conveniente evaluar el montaje y la conexión de partes y piezas al biodigestor como una letrina (inodoro) para canalizar las excretas humanas o la canalización del digerido a una huerta o extensión agrícola de drenaje subterráneo.
- Aunque esta investigación no aborda la generación de energía eléctrica desde el proceso de biodigestión, podría explorarse la posibilidad de la generación de energía a base de biogás a pequeña escala para iluminación de viviendas.
- Sería pertinente diagnosticar las competencias educativas, técnicas y tecnologías de la población refugiada ante la implementación de este sistema. Eso implicaría mejorar las competencias en alfabetización digital y conocimientos básicos de biodigestión anaeróbica.
- Para apoyar la transición hacia una sociedad más inclusiva, segura y sostenible con bajas emisiones de carbono, las comunidades de refugiados y desplazados tendrán que comprometerse con las nuevas tecnologías y comprender los beneficios de las energías renovables como el biogás. De forma paralela, estos beneficios deberían traducirse en una mejora de las relaciones con la comunidad de acogida, mitigando los conflictos por la competencia de recursos naturales.

8. Conclusiones

1. Los biorresiduos utilizados, procedentes de estiércol y restos alimentarios, permiten obtener una cantidad de biogás de entre 680 y 700L, en un periodo de 25 días en condiciones de temperatura dentro del biodigestor en el rango de los 24°C a 35°C y valores de pH cercanos a la neutralidad, dando unos rendimientos de alrededor de 700L de gas por cada 5 Kg de residuo, una vez el proceso se ha estabilizado.
2. El biogás obtenido presenta capacidad para generar energía térmica para cocinar distintos tipos de alimentos con un tiempo máximo de 80 min a fuego alto, consumiendo aproximadamente los 700 L de gas y que podría extenderse por más tiempo regulando el dosificador para la cocción de alimentos a temperaturas más bajas.
3. El digerido o digestato producido como consecuencia de la digestión anaerobia de los biorresiduos presenta una buena capacidad fertilizante. Dosis de 80ml/maceta de digerido biometanizado aportan resultados similares a fertilizantes convencionales, lo que abre la posibilidad de utilizar el digestato en huertos comunitarios dedicados a la agricultura familiar donde se encuentra instalados los campos de refugiados o en cultivos que requieren altos contenidos de N y K.
4. Se ha desarrollado un sistema de monitorización para los parámetros principales de control del proceso como el pH, la T^a, la HR, el nivel de llenado, y la detección de CO₂ por medio de la tecnología LoRa. Este sistema de red de bajo consumo de energía y largo alcance permitiría, una vez sensorizado el sistema de biodigestión, poder aprovechar las ventajas tanto de la conectividad remota, como de almacenamiento/procesamiento en la nube y de visualización

mediante paneles (*dashboards*) en cualquier tipo de dispositivo (sobremesa, portátil, Tablet o móvil, etc.).

5. La implementación de sistemas de biometanización de bajo coste asociados al registro y transmisión de datos por medio del protocolo de comunicación en red LoRaWAN en contextos humanitarios como los campos de refugiados y desplazados aportaría las siguientes ventajas:
 - Ofrece la posibilidad de control y monitoreo en tiempo real de los parámetros del sistema y el uso de las cocinas con datos sólidos mediante técnicas de procesamiento que pueden ser visualizadas en una variedad de dispositivos electrónicos desde cualquier parte del mundo.
 - Permite tomar decisiones informadas como la predicción de cambios bruscos de los parámetros ambientales y corregir posibles fallas del sistema a tiempo.
 - Posibilita la visualización sencilla de los datos, lo que permite comprender fácilmente los parámetros del sistema.
 - Supone un ahorro en tiempo y de recursos materiales y humanos, además de la mitigación de la huella de carbono por desplazamiento a los campos.
 - Se puede prescindir del montaje de pruebas y de análisis de laboratorio.
6. Se han podido identificar una serie de retos y oportunidades que pueden orientar investigaciones futuras en cuanto a la optimización y aplicabilidad de la digestión anaerobia de residuos orgánicos en contexto humanitarios.

9. Bibliografía

ACNUR. (2019, octubre 24). *ACNUR lanza una estrategia de energía sostenible y refuerza sus medidas para la acción climática.* <https://www.acnur.org/noticias/news-releases/acnur-lanza-una-estrategia-de-energia-sostenible-y-refuerza-sus-medidas-para-la-accion-climatica>

ACNUR. (2021, septiembre). Gestión de residuos en los campos de refugiados | eACNUR. *La importancia de la gestión de residuos en un campo de refugiados.* https://eacnur.org/blog/la-importancia-de-la-gestion-de-residuos-en-un-campo-de-refugiados-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/

ACNUR. (2022). *Tendencias Globales.* Tendencias Globales. <https://www.acnur.org/es-es/tendencias-globales.html>

Albert, P. L. (1999). *Seguridad alimentaria, tecnología y nutrición. Revista agroalimentaria*, 5(8), 49-57. (s. f.).

Alexander, S., Harris, P., & McCabe, B. K. (2019). Biogas in the suburbs: An untapped source of clean energy? *Journal of Cleaner Production*, 215, 1025-1035. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.118>

Alianza Shire. (2023). *Refugee camps in Shire – Refugee camps in Dollo Ado.* Recuperado el 22 de abril de 2023 de <https://alianzashire.org/en/projects/?lang=en>

Alibou, I. (2020, septiembre 7). *GreenCityzen Deploys LoRaWAN® Network for Water Distribution in Africa.* <https://www.thethingsnetwork.org/article/greencityzen-and-the-united-nations-secure-water-delivery-in-african-refugee-camps-using-lorawan>

Arshad, J., Aziz, M., Al-Huqail, A. A., Zaman, M. H. uz, Husnain, M., Rehman, A. U., & Shafiq, M. (2022). Implementation of a LoRaWAN Based Smart Agriculture Decision Support System for Optimum Crop Yield. *Sustainability*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su14020827>

Banco Mundial. (2022). *Desarrollo digital. Panorama general.* <https://www.bancomundial.org/es/topic/digitaldevelopment/overview>

Barak, N. (2021, noviembre 23). *HomeBiogas wins UN deal to convert waste in refugee camps—ISRAEL21c.* <https://www.israel21c.org/homebiogas-wins-un-deal-to-convert-waste-in-refugee-camps/>

Barbieri, J., Riva, F., & Colombo, E. (2017). Cooking in refugee camps and informal settlements: A review of available technologies and impacts on the socio-economic and environmental perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 194-207. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.007>

Bates, H., Pierce, M., & Benter, A. (2021). Real-Time Environmental Monitoring for Aquaculture Using a LoRaWAN-Based IoT Sensor Network. *Sensors*, 21(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/s21237963>

Batstone, D. J., Jensen, P. D., & Ge, H. (2011). Biochemical treatment of biosolids – Emerging technologies: Pre-treatment methods such as biological processes can improve performance economically. *Water*, 38(3), 90-93.

Borgwardt, H. (2022). *Conception of smart farming solutions in the context of Botswana's digital development: Identifying and evaluating potential innovations that enable smallholder farmers in Botswana to access data, connecting them to new resources, knowledge, and markets, based on a federated digital framework to advance Africa's transition to a digital economy.* <https://opus.hwg-konstanz.de/frontdoor/index/index/docId/3178>

Campos Pozuelo, E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria [Ph.D. Thesis, Universitat de Lleida]. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/8229>

Cayenne. (2023). *Cayenne Features*. Developer | myDevices.Com. Recuperado el 22 de noviembre de 2023 de <https://docs.mydevices.com/>

CCA. (2021, junio 22). *HomeBiogas: The Circular Economy Meets Clean Cooking*. Clean Cooking Alliance. <https://cleancooking.org/news/06-22-2021-homebiogas-the-circular-economy-meets-clean-cooking/>

CCA. (2022, agosto). *Accelerating Clean Cooking as a Nature-based Climate Solution*. Clean Cooking Alliance. <https://cleancooking.org/reports-and-tools/accelerating-clean-cooking-as-a-nature-based-climate-solution/>

CCA. (2023). *Climate & Environment*. Clean Cooking Protects the Climate and Environment <https://cleancooking.org/the-issues/climate-environment/>

CEPAL. (2021). *Tecnologías digitales para un nuevo futuro*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46816-tecnologias-digitales-un-nuevo-futuro>

Cheng, S., Li, Z., Mang, H.-P., Huba, E.-M., Gao, R., & Wang, X. (2014). Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 387-400. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.035>

Cherenfant, J.-A., & Tech, U. de L. > G. A.-B. (2022). *Evaluation de l'efficacité du thé de bouse de vache et effluent de biométhanisation sur le développement de la laitue cultivée à Ouanaminthe, Nord-Est, Haïti* [Université de Liège, Liège, Belgique]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/15475>

Chowdhury, H., Chowdhury, T., Sharifi, A., Corkish, R., & Sait, S. M. (2022). Role of Biogas in Achieving Sustainable Development Goals in Rohingya Refugee Camps in Bangladesh. *Sustainability*, 14(19), 11842. <https://doi.org/10.3390/su141911842>

Comisión Europea. (2023, febrero 23). *Banda ancha: Visión general de la tecnología / Configurar el futuro digital de Europa*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/broadband-technology-overview>

Cordaid. (2021, febrero 22). Waste to Clean Energy...Closing the Loop. *Dutch Relief Alliance*. <https://dutchrelief.org/waste-to-clean-energy-closing-the-loop/>

Cruz, I. A., Andrade, L. R. S., Bharagava, R. N., Nadda, A. K., Bilal, M., Figueiredo, R. T., & Ferreira, L. F. R. (2021). An overview of process monitoring for anaerobic digestion. *Biosystems Engineering*, 207, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.008>

DEFRA. (2011). *Anaerobic digestion strategy and action plan.*

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69400/anaerobic-digestion-strat-action-plan.pdf

EBA. (2018). *Digestate as Fertilizer.* German Biogas Association presents new brochure | European Biogas Association. [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/BJHCPA-DE-Digestate-as-Fertilizer/\\$file/Digestate_as_Fertilizer.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/BJHCPA-DE-Digestate-as-Fertilizer/$file/Digestate_as_Fertilizer.pdf)

ECHO. (2021, julio 19). *Compendium of good practices for a greener humanitarian response.* <https://reliefweb.int/report/bangladesh/compendium-good-practices-greener-humanitarian-response>

Ellen MacArthur Foundation. (2023). *The biological cycle of the butterfly diagram.* <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-biological-cycle-of-the-butterfly-diagram>

EnDev. (2022). *Increasing biodigester functionality for clean cooking in Kenya.* https://endev.info/wp-content/uploads/2022/12/ABC-Kenya_Functionality-assessment.pdf

EPA. (2018). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente* [Overviews and Factsheets]. Recuperado el 18 de abril de 2023 de <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>

EU. (2022). *Waste prevention and management—Environment—European Commission.* https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index_en.htm

EUR-Lex. (2022). *EUR-Lex—Ev0010—EN - EUR-Lex.* <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/eu-waste-management-law.html>

Eyrard, J., Girard, A., & Alome, K. (2015). *Biogas production in refugee camps: When sustainability increases safety and dignity.* https://repository.lboro.ac.uk/articles/conference_contribution/Biogas_production_in_refugee_camps_when_sustainability_increases_safety_and_dignity/9586637/1

Fachverband Biogas e. V. (2019). *Biomass to Biogas.*

[https://www.biogas.org/edcom/webfbv.nsf/id/DE-biomass-to-biogas_eng/\\$file/biomass-to-biogas.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfbv.nsf/id/DE-biomass-to-biogas_eng/$file/biomass-to-biogas.pdf)

Flotats, X., & Feliu, Á. (2019). *Los gases renovables. Un vector energético emergente.*

<https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/los-gases-renovables-un-vector-energetico-emergente/>

Gerard, S. (2022, junio 9). *How LoRaWAN Powers Ranch Livestock Tracking System.*

<https://www.mokolora.com/lorawan-livestock-tracking-system/>

Gianvenuti, A., Bedijo, N. G., Jalal, R., Hitimana, L., Walter, S., Linhares-Juvenal, T., & Xia, Z. (2022).

Woodfuel Consumption in Refugee Hosting Areas and Its Impact on the Surrounding Forests—
The Case of Uganda. *Forests*, 13(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/f13101676>

Girardin, C. A. J., Jenkins, S., Seddon, N., Allen, M., Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Griscom, B. W., &

Malhi, Y. (2021). Nature-based solutions can help cool the planet—if we act now. *Nature*, 593(7858), 191–194. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01241-2>

GSF. (2021). *Valuating the benefits of improved cooking solutions. Impact data in high resolution.*

https://www.goldstandard.org/sites/default/files/vivid_economics_ics_valuation_june2019.pdf

Halford, A., Gaura, E., Bhargava, K., Verba, N., Brusey, J., & Nixon, J. (2022). Off the boil? The

challenges of monitoring cooking behaviour in refugee settlements. *Energy Research & Social
Science*, 90, 102603. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102603>

Harild, N., Christensen, A., & Zetter, R. (2015). *Sustainable Refugee Return: Triggers, constraints and*

lessons on addressing the development challenges of forced displacement.

<https://www.rsc.ox.ac.uk/publications/sustainable-refugee-return-triggers-constraints-and-lessons-on-addressing-the-development-challenges-of-forced-displacement>

Haver K, Harmer A, Taylor G, Latimore TK. (2013). Evaluation of European Commission Integrated Approach of Food Security and Nutrition in Humanitarian Context. *Report.*

<https://www.calpnetwork.org/publication/evaluation-of-european-commission-integrated-approach-of-food-security-and-nutrition-in-humanitarian-context/>

Herrera-Cuenca, M., Landaeta-Jiménez, M., Hernandez, P., Sifontes, Y., Ramírez, G., Vásquez, M., & Maingon, T. (2022). Exploring food security/insecurity determinants within Venezuela's complex humanitarian emergency. *Dialogues in Health*, 1, 100084.
<https://doi.org/10.1016/j.dialog.2022.100084>

HomeBiogas. (2023a). *HomeBiogas. Owner's Manual*. Your Homebiogas. Recuperado el 22 de mayo de 2023 de https://www.homebiogas.com/wp-content/uploads/2021/03/HB2GF_0321_print_v2.pdf

HomeBiogas. (2023b). *How HomeBiogas Work*. HomeBiogas.
<https://www.homebiogas.com/explore/how-it-works/>

HomeBiogas. (2023c). *Shop—HomeBiogas*. <https://www.homebiogas.com/shop/>

Huber, S. (2019). *Small-scale biogas production from organic waste and application in mid-income countries – a case study of a Lebanese community*.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-385775>

ICRC. (2018). *Kenya: Can a refugee camp recycling project improve livelihoods?* (Africa/Kenya).
<https://www.icrc.org/en/document/kenya-dadaab-refugee-camp-recycle-plastic-income-livelihoods>

IEA. (2023, enero). *Population without access to clean cooking in the Stated Policies and in the Net Zero Scenarios, 2000-2030 – Charts – Data & Statistics*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/population-without-access-to-clean-cooking-in-the-stated-policies-and-in-the-net-zero-scenarios-2000-2030>

IFRC. (2021). *Introduction to Green Response / IFRC*. <https://www.ifrc.org/document/introduction-green-response>

IRENA. (2016). *Measuring small-scale biogas capacity and production.* https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Statistics_Measuring_small-scale_biogas_2016.pdf?rev=4133d62c4dfc4b0b9f3512563d5c3be6

Kang, A. J., Yuan, Q., Kang, A. J., & Yuan, Q. (2017). Enhanced Anaerobic Digestion of Organic Waste. *En Solid Waste Management in Rural Areas.* IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.70148>

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0.* Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

Kurkowska, M., Montangero, A., & Cippà, A. (2019, abril 3). *Dignifying sanitation services for the Rohingya refugees in Cox's Bazar camps.* <https://www.rural21.com/english/a-closer-look-at/detail/article/dignifying-sanitation-services-for-the-rohingya-refugees-in-coxs-bazar-camps.html>

La Información. (2017, octubre 13). *Así se vive en Zaatari, uno de los campos de refugiados más grandes del mundo.* https://www.lainformacion.com/mundo/zaatari-campos-refugiados-grandes-mundo_0_1012699962.html

Labatut, R., & Gooch, C. (2012). *Analytical Procedures for Monitoring Farm-based Anaerobic Digestion (AD) Systems.* <https://hdl.handle.net/1813/65824>

Li, Y., Alaimo, C. P., Kim, M., Kado, N. Y., Peppers, J., Xue, J., Wan, C., Green, P. G., Zhang, R., Jenkins, B. M., Vogel, C. F. A., Wuertz, S., Young, T. M., & Kleeman, M. J. (2019). Composition and Toxicity of Biogas Produced from Different Feedstocks in California. *Environmental science & technology,* 53(19), 11569-11579.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03003>

Maalim, S. A., Adwek, G., & Arowo, M. (2021). Shared energy parks as a solution to energy challenges for Dadaab Refugee Camps in Kenya. *Scientific African,* 13, e00901.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00901>

- Manni, M., Ragnacci, F., Filippucci, M., Coccia, V., Bianconi, F., Cotana, F., & Petrozzi, A. (2018). Refugee camps as an opportunity for promoting alternative development strategies based on carbon credits. *Energy Procedia*, 148, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.079>
- MAPA. (2010). *El sector del biogás agroindustrial en España*. https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf
- Martínez Eukliadias, M. (2022, junio). *Kutupalong, the world's largest refugee camp*. <https://tomorrow.city/a/kutupalong-largest-refugee-camp-world>
- Mavhunga, C. (Director). (2022a, mayo 13). *Zimbabwe Refugee Camp Goes Green with Animal Waste*. <https://www.voanews.com/a/zimbabwe-refugee-camp-goes-green-with-animal-waste/6569897.html>
- Mavhunga, C. (2022b, mayo 13). *Zimbabwe Refugee Camp Going Green with Animal Waste*. VOA. <https://www.voanews.com/a/zimbabwe-refugee-camp-going-green-with-animal-waste/6569811.html>
- Mena Roa, M. (2022, marzo 29). *Un mundo de residuos*. Statista Infografías. <https://es.statista.com/grafico/27140/desechos-solidos-municipales-generados-per-capita-al-ano>
- MITECO. (2022). *Hoja de Ruta del Biogás*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - El Consejo de Ministros aprueba la Hoja de Ruta del Biogás. <https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Paginas/consejo-ministros-aprueba-hoja-ruta-biogas.aspx>
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries*. German Agency for International Cooperation (GIZ) https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf

Nikhrothanon, W. (2014, febrero 6). *The Refugee House made from Wood,Bamboo and Leaf Roof at Refugee Camps in the North of Thailand Stock Photo—Alamy*. <https://www.alamy.com/stock-photo-the-refugee-house-made-from-woodbamboo-and-leaf-roof-at-refugee-camps-74336980.html>

Novo, C. (2020, diciembre 10). *Ben Harvey (UNHCR): «IoT can change the way humanitarian organisations monitor refugee operations»* [Text]. Smart Water Magazine; Smart Water Magazine. <https://smartwatermagazine.com/news/unhcr-un-refugee-agency/ben-harvey-unhcr-iot-can-change-way-humanitarian-organisations-monitor>

NRC. (2014, octubre 31). *Renewable energy in refugee camps*. NRC. <https://www.nrc.no/news/2014/october/renewable-energy-in-refugee-camps/?fbclid=IwAR3zV0pPnudCRqYjyBEGWZUivN6YquW3EFJAXFjiP3tKfT98PiXDIj50ias>

Obileke, K., Makaka, G., Nwokolo, N., Meyer, E. L., & Mukumba, P. (2022). Economic Analysis of Biogas Production via Biogas Digester Made from Composite Material. *ChemEngineering*, 6(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6050067>

OIM. (2022, octubre 28). *Informe de la OIM: 96.000 haitianos desplazados por la reciente violencia entre bandas en la capital*. International Organization for Migration. <https://www.iom.int/es/news/informe-de-la-oim-96000-haitianos-desplazados-por-la-reciente-violencia-entre-bandas-en-la-capital>

ONU. (2018). *Población / Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/global-issues/population>

ONU, U. (2016). *Conferencias / Países menos adelantados / Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/conferences/least-developed-countries>

Ortiz, D. L. P., Botero-Londoño, M. A., & Botero-Londoño, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: Revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros

subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), Article 1. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019013>

Owen, M. (2002). Cooking options in refugee situations: A handbook of experiences in energy conservation and alternative fuels. *The Office of the United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR)*. <https://www.unhcr.org/406c368f2.pdf>

OXFAM. (2008). *Domestic and Refugee Camp Waste Management Collection and Disposal*. Oxfam Policy & Practice. <https://policy-practice.oxfam.org/resources/domestic-and-refugee-camp-waste-management-collection-and-disposal-126686/>

OXFAM. (2011). *Design, Construction and Maintenance of a Biogas Generator*. Oxfam Policy & Practice. <https://policy-practice.oxfam.org/resources/design-construction-and-maintenance-of-a-biogas-generator-136537/>

OXFAM. (2019). *Biogas Changed My Life*. Oxfam in Uganda. <https://uganda.oxfam.org/latest/stories/biogas-changed-my-life>

Paritosh, K., Kushwaha, S. K., Yadav, M., Pareek, N., Chawade, A., & Vivekanand, V. (2017). Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling. *BioMed Research International*, 2017, 2370927. <https://doi.org/10.1155/2017/2370927>

Parlamento Europeo y del Consejo. (2018, diciembre 21). *BOE.es—DOUE-L-2018-82107 Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2018-82107>

Patrick, E. (2007). *Violencia sexual y recolección de leña en Darfur*. Violencia sexual: arma de guerra, obstáculo para la paz | Forced Migration Review. FMR (27), 40-41. <https://www.fmreview.org/es/violenciasexual>

- Pilloni, M., Hamed, T. A., Pilloni, M., & Hamed, T. A. (2021). Small-Size Biogas Technology Applications for Rural Areas in the Context of Developing Countries. En *Anaerobic Digestion in Built Environments*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96857>
- Pinkerton, D. (2022, febrero 8). *Biogas Systems Treat Refugee Camp Organics*. BioCycle. <https://www.biocycle.net/biogas-systems-treat-refugee-camp-organics/>
- PNUD. (2022). *Informe sobre desarrollo humano*. https://hdr.undp.org/system/files/documents/global-report-document/hdr2021-22pdf_1.pdf
- Pollock, E., Kaur, H., Shinde, R., Batineih, S., & Dandapat, A. (2019). Off-Grid Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 297(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/297/1/012021>
- Presidian Editor. (2015, febrero 10). *Power Play: Is smart energy possible in Afghanistan? • Presidio Graduate School*. Presidio Graduate School. <https://www.presidio.edu/blog/power-play-is-smart-energy-possible-in-afghanistan/>
- Regattieri, A., Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Piana, F. (2018). Biogas Micro-Production from Human Organic Waste—A Research Proposal. *Sustainability*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su10020330>
- Regattieri, A., Santarelli, G., Piana, F., & Gamberi, M. (2015). Classification of Technical Requirements and the Means of Addressing the Problem of Waste Management in a Refugee Camp. En M. Klumpp, S. de Leeuw, A. Regattieri, & R. de Souza (Eds.), *Humanitarian Logistics and Sustainability* (pp. 169-192). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15455-8_10
- Rivoal & Haselip, M., JA. (2017). *The true cost of using traditional fuels in a humanitarian setting. Case study of the Nyarugusu refugee camp, Kigoma region, Tanzania*. UNEP-CCC. <https://unepccc.org/publications/the-true-cost-of-using-traditional-fuels-in-a-humanitarian-setting-case-study-of-the-nyarugusu-refugee-camp-kigoma-region-tanzania/>

Rojas, F., Jiménez, F., & Napan, L. (2021). *Evaluación De Eficiencia Energética En Cocinas Domésticas A Gas Natural Y Calidad Ambiental De Interiores En Lima Metropolitana.* <https://www.laccei.org/LACCEI2021-VirtualEdition/meta/FP39.html>

Sánchez-Reyes, C., Patiño-Iglesias, M. E., Alcántara-Flores, J. L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M. A., Ortíz-Muñoz, E., Sánchez-Reyes, C., Patiño-Iglesias, M. E., Alcántara-Flores, J. L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M. A., & Ortíz-Muñoz, E. (2016). Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 191-198. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>

Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>

Semtech. (2023). *LoRa and LoRaWAN: Technical overview / DEVELOPER PORTAL*. <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>

Silva, F. P., Otto, R. B., Braggio, A. A., & Kitamura, D. S. (2019). Monitoring Systems Parameters, Sensors and Technologies for Renewable Energies: Biogas Case Study. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 17, 423-428. <https://doi.org/10.24084/repqj17.332>

Silva Torres, D. A., & Coello Hurtado, J. I. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de sensores de temperatura, turbidez, TDS Y PH para la calidad del agua utilizando la tecnología LoRaWAN* [bachelorThesis]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19627>

SSWM. (2018). *Reactor de biogas / SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!* <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/recolección-y-almacenamiento/reactor-de-biogas>

The Things Network. (2023). *LoRaWAN Architecture*. The Things Network. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrugg, C. (2014). *Compendium of sanitation systems and technologies 2nd edition*. Eawag – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.

Trinh, J., & Wieselblad, E. (2018). *Energy Supply in Refugee Camps*.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-230656>

Tshemese, Z., Deenadayalu, N., Linganiso, L. Z., & Chetty, M. (2023). An Overview of Biogas Production from Anaerobic Digestion and the Possibility of Using Sugarcane Wastewater and Municipal Solid Waste in a South African Context. *Applied System Innovation*, 6(1), Article 1.
<https://doi.org/10.3390/asi6010013>

Uddin, S. M. N., Gutberlet, J., Chowdhury, A. T., Parisa, T. A., Nuzhat, S., & Chowdhury, S. N. (2022). Exploring waste and sanitation-borne hazards in Rohingya refugee camps in Bangladesh. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 12(8), 587-599.
<https://doi.org/10.2166/washdev.2022.068>

UNFCCC. (2023). *El Acuerdo de París / CMNUCC*. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

UNHCR. (2022a). *Operational Strategy for Climate Resilience and Environmental Sustainability 2022-2025*. <https://www.unhcr.org/protection/environment/61b771964/operational-strategy-climate-resilience-environmental-sustainability-2022.html>

UNHCR. (2002). *Handbook of Experiences in Energy Conservation and Alternative Fuels: Cooking Options in Refugee Situations*. UNHCR.
<https://www.unhcr.org/protection/environment/406c368f2/handbook-experiences-energy-conservation-alternative-fuels-cooking-options.html>

UNHCR. (2014a). *Global Strategy for Safe Access to Fuel and Energy (SAFE)*. UNHCR.
<https://www.unhcr.org/protection/environment/530f11ee6/global-strategy-safe-access-fuel-energy-safe.html>

- UNHCR. (2014b). *Resolve conflicts or face surge in life-long refugees worldwide, warns UNHCR Special Envoy.* UNHCR. <https://www.unhcr.org/news/press/2014/6/53a42f6d9/resolve-conflicts-face-surge-life-long-refugees-worldwide-warns-unhcr-special.html>
- UNHCR. (2017). *Basic Needs Approach in the Refugee Response—World / ReliefWeb.* <https://reliefweb.int/report/world/basic-needs-approach-refugee-response>
- UNHCR. (2018). *New York Declaration for Refugees and Migrants.* UNHCR Quick Guide. <https://www.unhcr.org/events/conferences/57e4f6504/new-york-declaration-quick-guide.html>
- UNHCR. (2021). *Annual Report 2021 on Sustainable Energy.* UNHCR. <https://www.unhcr.org/media/40145>
- UNHCR. (2022b). *UNHCR: Global displacement hits another record, capping decade-long rising trend.* Global Displacement Hits Another Record, Capping Decade-Long Rising Trend. <https://www.unhcr.org/news/press/2022/6/62a9d2b04/unhcr-global-displacement-hits-record-capping-decade-long-rising-trend.html>
- UNHCR. (2022c). *What is a Refugee Camp? Definition and Statistics / USA for UNHCR.* Refugee Camps. <https://www.unrefugees.org/refugee-facts/camps/>
- UNHCR. (2023a). *Clean Energy Challenge.* <https://www.unhcr.org/what-we-do/how-we-work/environment-disasters-and-climate-change/clean-energy-challenge>
- UNHCR. (2023b). *Refugee Environmental Protection Fund.* UNHCR. <https://www.unhcr.org/refugee-environmental-protection-fund.html>
- UNHCR. (2023c). *The UN Global Goals and Forced Displacement.* UNHCR Nordic and Baltic Countries. <https://www.unhcr.org/neu/unhcr-and-sustainable-development-goals>
- Uttom Rozario, S. (2018). *Rohingya get gas, stoves and saplings to save environment—UCA News.* Ucanews.Com. <https://www.ucanews.com/news/rohingya-get-gas-stoves-and-saplings-to-save-environment/83060>

van Kruchten, S., & van Eijk, F. (2020). *Circular Economy & SDGs. How circular economy practices help to achieve the Sustainable Development Goals.*
https://circularconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/3228_brochure_sdg_-_hch_cmyk_a4_portrait_-_0520-012.pdf

Varnero, M. (2011). *Manual de biogás / FAO.* Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar.
<https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/342734/>

Vasco-Correa, J., Khanal, S., Manandhar, A., & Shah, A. (2018). Anaerobic digestion for bioenergy production: Global status, environmental and techno-economic implications, and government policies. *Bioresource Technology*, 247, 1015-1026.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.004>

Vinti, G., & Vaccari, M. (2022). Solid Waste Management in Rural Communities of Developing Countries: An Overview of Challenges and Opportunities. *Clean Technologies*, 4(4), Article 4.
<https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040069>

Vögeli, Y., Lohri, R., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrugg, C. (2014). *Anaerobic digestion of biowaste in developing countries: Practical information and case studies.* Eawag – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. <https://www.ircwash.org/sites/default/files/2014-biwaste-eawag.pdf>

Wang, K., Costanza-van den Belt, M., Heath, G., Walzberg, J., Curtis, T., Barrie, J., Schröder, P., Lazer, L., & Altamirano, J. (2022, noviembre 17). *Circular economy as a climate strategy: Current knowledge and calls-to-action.* European Circular Economy Stakeholder Platform.
<https://circularconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/circular-economy-climate-strategy-current-knowledge-and-calls-action>

WEF. (2021, octubre 27). *Cooking with polluting fuels is a silent killer—Here's what can be done.* World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2021/10/polluting-cooking-fuels-deaths-women-climate/>

WFP & ILF. (2019). *Safe Access to Fuel & Energy. Building community resilience to climate shocks through efficient energy markets.* <https://lifelinefund.org/wp-content/uploads/2020/05/SAFE-Brochure.pdf>

WHO. (2021). *Defining clean fuels and technologies.* <https://www.who.int/tools/clean-household-energy-solutions-toolkit/module-7-defining-clean>

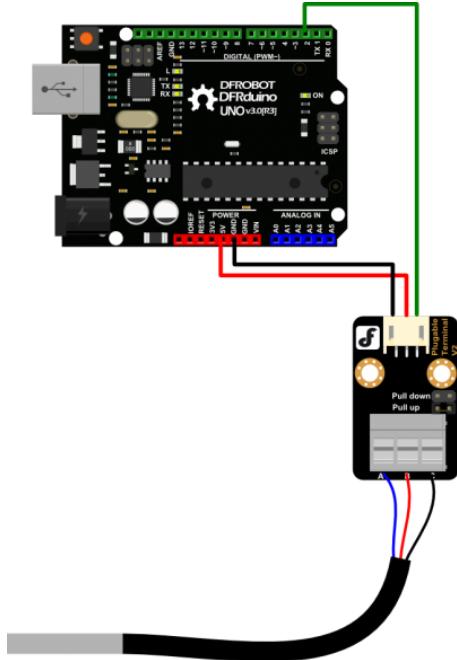
World Bank. (2018). *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes.* World Bank.
<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>

10.Anexos

Anexo 1. Diagrama de conexión y códigos programación sensores⁴

SENSOR DE TEMPERATURA PARA LÍQUIDOS DS18B20

Diagrama de conexión



Código de programación

```
#include <OneWire.h>

int DS18S20_Pin = 2; //DS18S20 Signal pin on digital 2

//Temperature chip i/o
OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 2

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
}
```

⁴ Desde DFRobot Open-Source Hardware Electronics and Kits. <https://www.dfrobot.com/>

```
void loop(void) {
    float temperature = getTemp();
    Serial.println(temperature);

    delay(100); //just here to slow down the output so it is easier to read

}

float getTemp(){
    //returns the temperature from one DS18S20 in DEG Celsius

    byte data[12];
    byte addr[8];

    if ( !ds.search(addr)) {
        //no more sensors on chain, reset search
        ds.reset_search();
        return -1000;
    }

    if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
        Serial.println("CRC is not valid!");
        return -1000;
    }

    if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
        Serial.print("Device is not recognized");
        return -1000;
    }

    ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0x44,1); // start conversion, with parasite power on at the end

    byte present = ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0xBE); // Read Scratchpad
```

```

for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
    data[i] = ds.read();
}

ds.reset_search();

byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

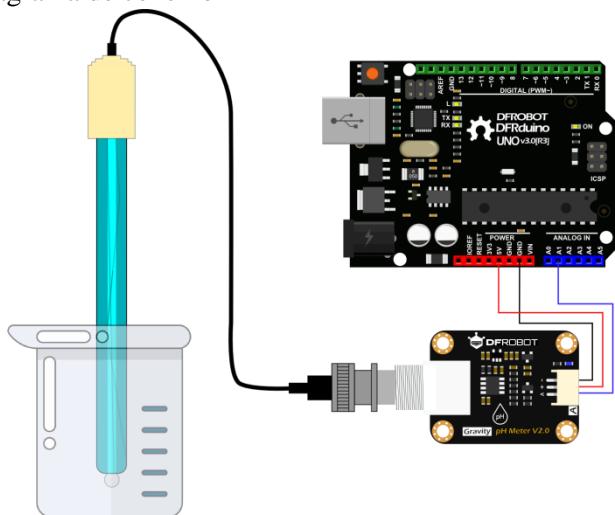
float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); //using two's compliment
float TemperatureSum = tempRead / 16;

return TemperatureSum;
}

```

SENSOR DE PH EN0169-V2

Diagrama de conexión



Código de programación

```

/*
 * file DFRobot_PH.ino
 * @ https://github.com/DFRobot/DFRobot_PH
 *

```

```

 * This is the sample code for Gravity: Analog pH Sensor / Meter Kit V2, SKU:SEN0161-
V2

 * In order to guarantee precision, a temperature sensor such as DS18B20 is needed,
to execute automatic temperature compensation.

 * You can send commands in the serial monitor to execute the calibration.

 * Serial Commands:

 *   enterph -> enter the calibration mode

 *   calph  -> calibrate with the standard buffer solution, two buffer solutions(4.0
and 7.0) will be automatically recognized

 *   exitph  -> save the calibrated parameters and exit from calibration mode

 *

 * Copyright  [DFRobot](http://www.dfrobot.com), 2018

 * Copyright  GNU Lesser General Public License

 *

 * version  V1.0

 * date  2018-04

 */

#include "DFRobot_PH.h"
#include <EEPROM.h>

#define PH_PIN A1
float voltage,phValue,temperature = 25;
DFRobot_PH ph;

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    ph.begin();
}

void loop()
{
    static unsigned long timepoint = millis();
    if(millis()-timepoint>1000U){           //time interval: 1s
        timepoint = millis();
        //temperature = readTemperature();      // read your temperature sensor
        to execute temperature compensation
        voltage = analogRead(PH_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage
        phValue = ph.readPH(voltage,temperature); // convert voltage to pH with
        temperature compensation
}

```

```

        Serial.print("temperature:");
        Serial.print(temperature,1);
        Serial.print("^C  pH:");
        Serial.println(phValue,2);
    }

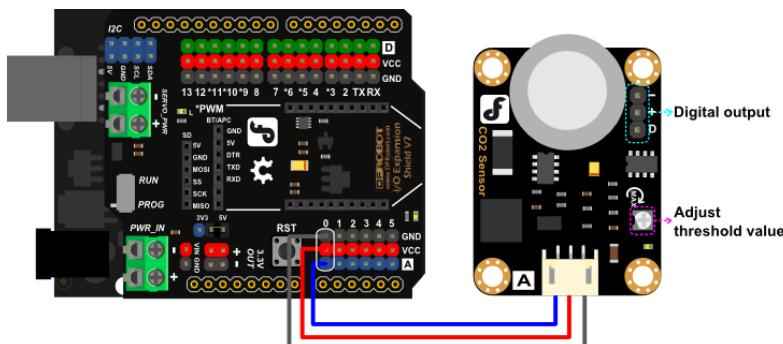
    ph.calibration(voltage,temperature); // calibration process by Serial
CMD
}

float readTemperature()
{
    //add your code here to get the temperature from your temperature sensor
}

```

SENSOR ELECTROQUÍMICO DE CO₂ SEN0159

Diagrama de conexión



```
*****
**/


/*********************Hardware
Macros*****/


#define      MG_PIN          (A0)      //define which analog input
channel you are going to use

#define      BOOL_PIN         (2)       //define the digital pin

#define      DC_GAIN          (8.5)     //define the DC gain of
amplifier


/*********************Software
Macros*****/


#define      READ_SAMPLE_INTERVAL   (50)     //define how many samples you
are going to take in normal operation

#define      READ_SAMPLE_TIMES      (5)      //define the time interval(in
milisecond) between each samples in
                                         //normal operation


/*********************Application
Macros*****/


//These two values differ from sensor to sensor. user should determine this value.

#define      ZERO_POINT_VOLTAGE    (0.220)   //define the output of the
sensor in volts when the concentration of CO2 is 400PPM

#define      REACTION_VOLTGAE      (0.030)   //define the voltage drop of
the sensor when move the sensor from air into 1000ppm CO2


/*********************Globals
**/


float      CO2Curve[3] = {2.602,ZERO_POINT_VOLTAGE,(REACTION_VOLTGAE/(2.602-
3))};                                         //two points are taken from
                                                 //the curve.

                                                 //with these two points, a
line is formed which is
                                                 //approximately equivalent
to the original curve.
                                                 //data format:{ x, y, slope};

point1: (lg400, 0.324), point2: (lg4000, 0.280)           //slope = ( reaction voltage )
// (log400 -log1000)

void setup()
{
  Serial.begin(9600);                                     //UART setup, baudrate = 9600bps
}
```

```

pinMode(BOOL_PIN, INPUT);           //set pin to input
digitalWrite(BOOL_PIN, HIGH);      //turn on pullup resistors

Serial.print("MG-811 Demostration\n");
}

void loop()
{
    int percentage;
    float volts;

    volts = MGRead(MG_PIN);
    Serial.print( "SEN0159:" );
    Serial.print(volts);
    Serial.print( "V" );
    Serial.print( " " );

    percentage = MGGetPercentage(volts,C02Curve);
    Serial.print("CO2:");
    if (percentage == -1) {
        Serial.print( "<400" );
    } else {
        Serial.print(percentage);
    }

    Serial.print( "ppm" );
    Serial.print("\n");

    if (digitalRead(BOOL_PIN) ){
        Serial.print( "=====BOOL is HIGH=====" );
    } else {
        Serial.print( "=====BOOL is LOW=====" );
    }

    Serial.print("\n");

    delay(500);
}

*****MGRead*****
*****MGRead*****

```

```

Input:    mg_pin - analog channel
Output:   output of SEN-000007
Remarks: This function reads the output of SEN-000007
*****
*/
float MGRead(int mg_pin)
{
    int i;
    float v=0;

    for (i=0; i<READ_SAMPLE_TIMES; i++)
    {
        v += analogRead(mg_pin);
        delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
    }
    v = (v/READ_SAMPLE_TIMES) *5/1024 ;
    return v;
}

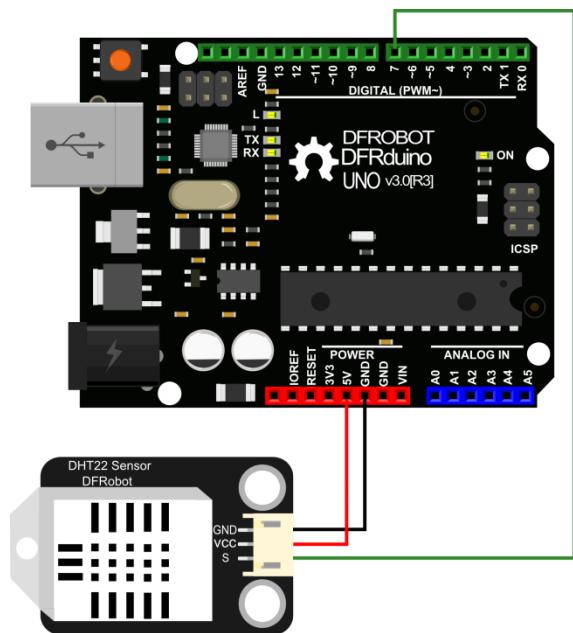
***** MQGetPercentage *****
Input:    volts    - SEN-000007 output measured in volts
          pcurve  - pointer to the curve of the target gas
Output:   ppm of the target gas
Remarks: By using the slope and a point of the line. The x(logarithmic value of ppm)
          of the line could be derived if y(MG-811 output) is provided. As it is a
          logarithmic coordinate, power of 10 is used to convert the result to non-
          logarithmic
          value.

*/
int MGGetPercentage(float volts, float *pcurve)
{
    if ((volts/DC_GAIN )>=ZERO_POINT_VOLTAGE) {
        return -1;
    } else {
        return pow(10, ((volts/DC_GAIN)-pcurve[1])/pcurve[2]+pcurve[0]);
    }
}

```

SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE DHT22

Diagrama de conexión



Código de programación

```
#include <dht.h>

dht DHT;
#define DHT22_PIN 7

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("DHT TEST PROGRAM ");
    Serial.print("LIBRARY VERSION: ");
    Serial.println(DHT_LIB_VERSION);
    Serial.println();
    Serial.println("Type,\tstatus,\tHumidity (%),\tTemperature (C)");
}

void loop()
{
```

```

Serial.print("DHT22, \t");
int chk = DHT.read22(DHT22_PIN); //读取数据
switch (chk)
{
    case DHTLIB_OK:
        Serial.print("OK,\t");
        break;
    case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM:
        Serial.print("Checksum error,\t");
        break;
    case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT:
        Serial.print("Time out error,\t");
        break;
    default:
        Serial.print("Unknown error,\t");
        break;
}

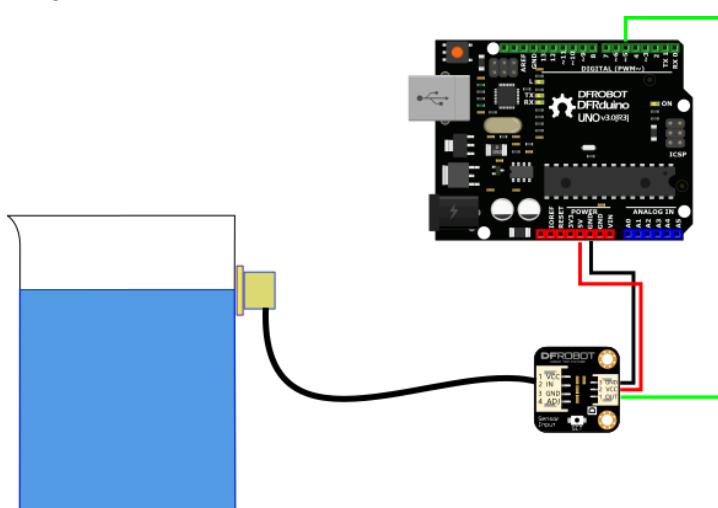
Serial.print(DHT.humidity, 1);
Serial.print(",\t");
Serial.println(DHT.temperature, 1);

delay(1000);
}

```

SENSOR DE NIVEL DE LÍQUIDO EXTERIOR SEN0204

Diagrama de conexión

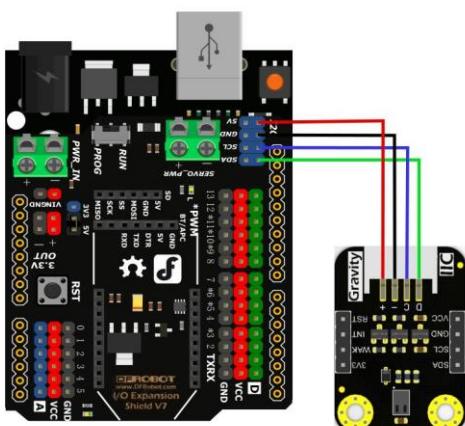


Código de programación

```
/*!  
 * @file SEN0204.ino  
 * @brief This example is to get liquid level. (Liquid Level Sensor-XKC-Y25-T12V)  
 * @copyright Copyright (c) 2010 DFRobot Co.Ltd (http://www.dfrobot.com)  
 * @license The MIT License (MIT)  
 * @author jackli(Jack.li@dfrobot.com)  
 * @version V1.0  
 * @date 2016-1-30  
 */  
  
int liquidLevel = 0;  
  
void setup()  
{  
    Serial.begin(9600);  
    pinMode(5, INPUT);  
}  
  
void loop()  
{  
    liquidLevel = digitalRead(5);  
    Serial.print("liquidLevel= "); Serial.println(liquidLevel, DEC);  
    delay(500);  
}
```

SENSOR DE CALIDAD DEL AIRE CCS811

Diagrama de conexión



Código de programación

```
/*
 * @file getBaseLine.ino
 * @brief Put the module in clear air and work a few minutes, wait for baseline
 * doing not change
 * @n Experiment phenomenon: get
 *
 * @copyright Copyright (c) 2010 DFRobot Co.Ltd (http://www.dfrobot.com)
 * @licence The MIT License (MIT)
 * @author [LuoYufeng](yufeng.luo@dfrobot.com)
 * @version V0.1
 * @date 2019-07-19
 * @get from https://www.dfrobot.com
 * @url https://github.com/DFRobot/DFRobot_CCS811
 */
#include "DFRobot_CCS811.h"

/*
 * IIC address default 0x5A, the address becomes 0x5B if the ADDR_SEL is soldered.
 */
//DFRobot_CCS811 CCS811(&Wire, /*IIC_ADDRESS=*/0x5A);
DFRobot_CCS811 CCS811;

void setup(void)
{
    Serial.begin(115200);
    /*Wait for the chip to be initialized completely, and then exit*/
    while(CCS811.begin() != 0){
        Serial.println("failed to init chip, please check if the chip connection is
fine");
        delay(1000);
    }
}

void loop() {
    if(CCS811.checkDataReady() == true){
        /*
         * @brief Set baseline
         * @return baseline in clear air
    }
```

```

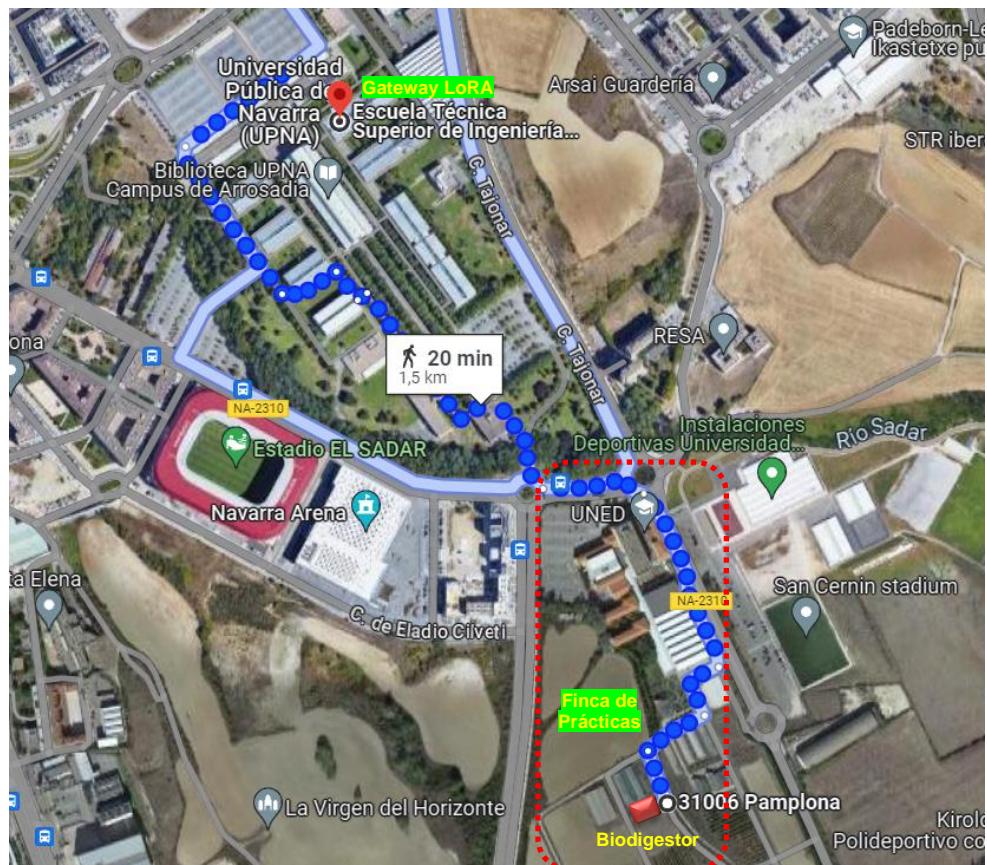
  */
  Serial.println(CC811.readBaseLine(), HEX);

} else {
  Serial.println("Data is not ready!");
}

//delay cannot be less than measurement cycle
delay(1000);
}

```

Anexo 2: Localización del biodigestor y distancia de Red LoRa⁵



⁵ Mapa Google Earth. Distancia 1.5km