

Modalidad: Artículo profesional y/o de investigación

Secado solar de lodos en invernadero y su valorización agronómica en Uruguay

Kelly Andressa Liesenfeld¹, Marcelo Coletto Rola¹, Vitoria Olave de Freitas¹



¹ Departamento de Sostenibilidad Ambiental, Universidad Tecnológica (UTEC), Uruguay; kelly.liesenfeld@utec.edu.uy, ORCID: 0009-0006-5278-4160; marcelo.coletto@utec.edu.uy, ORCID: 0009-0006-5425-4067; vitoria.olave@utec.edu.uy, ORCID: 0009-0007-5272-9476.

Resumen

El objetivo del presente trabajo es evaluar el proceso de secado solar de un lodo generado por una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria alimenticia en Uruguay, y analizar su potencial de valorización agronómica. Se realizaron ensayos durante el período de invierno en un invernadero de 3 m², utilizando capas de lodo de 5, 10 y 15 cm de espesor, monitoreando semanalmente su contenido de humedad. El lodo presentaba inicialmente un contenido de humedad del 83% (b.h) y, tras el proceso de secado, alcanzó valores finales de 8% (30 días), 6% (60 días) y 54% (60 días) en las capas de 5, 10 y 15 cm, respectivamente. El lodo seco, con un 8% de humedad, fue analizado para su valorización agronómica, siendo determinada la concentración de metales pesados y coliformes fecales. En cuanto a los coliformes fecales, además de cumplir con la normativa uruguaya para uso agrícola, se evaluó si el secado solar reducía su concentración, logrando una disminución del 96%. Asimismo, los metales pesados también cumplen con la normativa establecida para uso agrícola. Este estudio destaca el secado solar como una tecnología económica y sostenible que optimiza la gestión de lodos, integrando principios de economía circular y promoviendo su valorización como recurso en aplicaciones agrícolas.

Palabras clave: Economía circular, gestión de residuos, sostenibilidad ambiental

Abstract

The objective of this study is to evaluate the solar drying process of sludge generated by a wastewater treatment plant in a food industry in Uruguay and analyze its potential for agronomic valorization. Experiments were conducted during the winter period in a 3 m² greenhouse using sludge layers of 5, 10, and 15 cm thickness, with weekly monitoring of their moisture content. Initially, the sludge had a moisture content of 83%, which, after the

drying process, reached final values of 8% (30 days), 6% (60 days), and 54% (60 days) for the 5, 10, and 15 cm layers, respectively. The dried sludge, with 8% moisture content, was analyzed for its agronomic valorization, determining the concentration of heavy metals and fecal coliforms. Regarding fecal coliforms, in addition to meeting the Uruguayan regulations for agricultural use, the solar drying process was evaluated for its ability to reduce their concentration, achieving a 96% decrease. Likewise, heavy metals also comply with the established regulations for agricultural use. This study highlights solar drying as an economical and sustainable technology that optimizes sludge management, integrates circular economy principles, and promotes its valorization as a resource for agricultural applications.

Key words: *Circular economy, waste management, environmental sustainability*

Introducción

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015, tiene como objetivo enfrentar los desafíos más urgentes de la humanidad mediante un enfoque integral, abarcando aspectos sociales, económicos y ambientales. Para ello, la Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que incluyen áreas clave como la erradicación de la pobreza, seguridad alimentaria, educación de calidad, la lucha contra el cambio climático, la creación de sociedades inclusivas y justas, entre otras (Naciones Unidas, 2015).

La economía circular, se puede definir como un sistema económico que utiliza un enfoque sistémico para mantener un flujo circular de recursos, recuperando, reteniendo o agregando valor, conectando las dimensiones social, ambiental y económica del desarrollo sostenible, aportando a diversos de los ODS. El gobierno uruguayo ha implementado durante varios años una serie de planes y estrategias nacionales orientadas a una transición hacia una economía circular. Ejemplos de ellos son la Política Nacional de Cambio Climático, el Plan Nacional de Aguas, el Plan Nacional de Gestión de Residuos. Estas iniciativas han impulsado la adopción de prácticas de economía circular en diversas áreas, como el compostaje, reciclaje de nutrientes en tambos, servicios de mantenimiento y reparación, sustitución de combustibles fósiles, uso circular de materiales, aprovechamiento del poder calorífico de residuos, uso eficiente de recursos, entre otros (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] y Gobierno del Uruguay, 2024).

El Plan Nacional de Gestión de Residuos (PNGR), publicado en el año de 2021, es una herramienta de planificación estratégica para optimizar la gestión de residuos en Uruguay, buscando promover un cambio de paradigma para concebir los residuos como recursos, identificar la oportunidad de transformarlos, apostar a su revalorización y buscar como primer paso, minimizar su generación (Ministerio de Ambiente, 2021).

El tratamiento y la gestión de los lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), son uno de los desafíos más importantes y críticos de este proceso, tanto en términos económicos, como ambientales y sociales. Estos residuos son generados en grandes volúmenes y pueden contener una amplia gama de sustancias orgánicas y/o inorgánicas, que pueden ser perjudiciales al medio ambiente y a la salud humana, exigiendo un manejo, tratamiento y disposición adecuados (Vávrová et al., 2023). Este proceso implica elevados costos operativos, que puede llegar a representar entre el 40% y el 50% del total de los gastos de operación de las PTAR (Mathioudakis, 2009). Una alternativa a esta problemática es agregar valor a los residuos, transformándolos en productos de valor agregado, haciendo con que las PTAR sean más sostenibles ambiental y financieramente (Rodríguez et al., 2020). Para lograrlo es necesario someter estos residuos a tratamientos específicos, según sus características y destino final.

Los tratamientos de lodos se centran principalmente en la estabilización, la eliminación de compuestos tóxicos y en la reducción de volumen a través de métodos de deshidratación mecánica o térmica. Los lodos están compuestos principalmente por agua, pudiendo alcanzar hasta el 90% de humedad. Los métodos mecánicos son los más utilizados, logrando reducir entre el 20% y el 40% del agua presente. Para alcanzar menores porcentajes de humedad, es necesario recurrir a métodos térmicos (Tchobanoglous et al., 2003), los cuales permiten reducir los costos de almacenamiento, manipulación y transporte, pero implican un alto consumo de energía y, dependiendo de la técnica empleada, pueden generar importantes emisiones de gases de efecto invernadero (Cota Espericueta y Ponce Corral, 2008).

El secado de lodos mediante invernaderos solares es una alternativa de fácil operación, bajo mantenimiento, impacto ambiental y costo operativo, cuando comparado a los métodos tradicionales. Consiste en esparcir los lodos sobre el suelo del invernadero, ventilarlos para eliminar el vapor de agua y mezclarlos frecuentemente para acelerar el secado y controlar olores (Slim y Clodic, 2008; Garanto, 2016). Para lograr una reducción significativa de la humedad en estos residuos, es crucial instalar el invernadero en una ubicación con alta irradiancia solar y controlar la temperatura, la humedad y el flujo de aire en su interior. Esta tecnología, ya consolidada en países como Alemania, Estados Unidos, Polonia y Colombia (Huber Technology, 2024), presenta un alto potencial de implementación en Uruguay. Esto se debe a que el territorio nacional dispone de

condiciones de irradiancia solar favorables, con una media anual de 4,6 kWh/m²/día (Alonso-Suárez, 2017). De acuerdo con el autor, el país exhibe una marcada variación estacional, con registros que oscilan entre un mínimo de 2,2 kWh/m²/día en junio y máximos de 7,0 kWh/m²/día durante diciembre y enero. No obstante, la variabilidad espacial es menos intensa y en este sentido los departamentos de Salto y Artigas alcanzan los valores máximos de irradiancia media diaria, mientras que Rocha y Maldonado registran los mínimos. Durante el verano, las diferencias geográficas se reducen a niveles mínimos, lo que resulta en un recurso solar homogéneo en todo el país y se incrementa hacia el invierno, alcanzando una diferencia equivalente al 12% de la media anual (0,6 kWh/m²/día) (Alonso-Suárez, 2017). La región central del país, en Durazno específicamente, presenta una media anual de 4,65 kWh/m²/día, con máximos y mínimos similares a los valores nacionales, conforme datos del Mapa Solar del Uruguay (MSU), (Alonso-Suárez et al., 2014). A pesar de estas condiciones favorables, no se han identificado estudios publicados en Uruguay que evalúen el secado solar de lodos bajo condiciones climáticas invernales.

Los lodos tratados pueden utilizarse en diversas aplicaciones, como la recuperación de suelos degradados, la producción de compost o fertilizantes para la agricultura, e incluso como combustibles alternativos (Rodríguez et al., 2020). En particular, su uso en la agricultura ha sido ampliamente estudiado, destacando su alto contenido de macronutrientes y materia orgánica (MO), lo que los convierte en una opción atractiva para mejorar la calidad del suelo (Cooker, 1983; Abad et al., 2005, citados por Cota-Espéricueta y Ponce-Corral, 2008).

En Uruguay, esta alternativa adquiere particular relevancia, dado que los sistemas agropecuarios predominantes enfrentan procesos de degradación edáfica asociados a la reducción del contenido de MO. En sistemas de agricultura continua se han estimado tasas de pérdida de MO de entre 1% y 4% anual, alcanzando reducciones acumuladas de hasta 23% en sistemas agrícola-cerealeros y entre 31% y 44% en sistemas hortícolas, principalmente debido a la intensidad del uso del suelo y a la erosión hídrica (Díaz, 1994; García de Souza et al., 2011; Gilsanz et al., 2013).

No obstante, la aplicación de lodos en la agricultura debe realizarse con precaución, ya que estos pueden tener microorganismos patógenos, como bacterias y virus (Sahlströma et al., 2004), así como metales pesados que podrían representar riesgos ambientales y de salud pública (Bose y Bhattacharyya, 2008). En la Unión Europea y Estados Unidos, su aplicación agrícola está regulada bajo estrictos controles de calidad, incluyendo límites de metales, reducción de patógenos y atracción de vectores. En Uruguay, para la valorización agronómica del lodo como enmienda orgánica es necesario registrarlo ante el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) y cumplir con los requisitos técnicos especificados en la Resolución n° 141/018 (MGPA, 2018).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar el proceso de secado solar del lodo generado por una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una empresa alimenticia, evaluando su potencial de valorización agronómica.

Metodología

Materia Prima: Lodo

El lodo utilizado en este estudio es un subproducto generado durante el tratamiento de las aguas residuales de una industria del rubro alimenticio ubicada en el interior del Uruguay. Este producto recibe un tratamiento de espesado por gravedad y centrifugado con la adición de polielectrolito.

Secado Solar: Características del secador y proceso de secado del lodo

El secador utilizado en este estudio es del tipo invernadero, construido de policarbonato alveolar y con dimensiones de 1,5 m de ancho, 2 m de largo y 1,9 m de alto. Está compuesto por un extractor de aire, controlado por sensores de humedad y temperatura, instalados en el interior y exterior del sistema. El prototipo fue instalado en el Instituto Tecnológico Centro Sur de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), ubicado en la ciudad de Durazno, Uruguay. Los datos de irradiancia global horizontal (GHI) fueron obtenidos de la estación meteorológica, instalada en la universidad, modelo Vantage Pro2Plus. Para mayores detalles del prototipo y del sistema de adquisición de datos consultar (Freitas, Rola, & Liesenfeld, 2022).

La evaluación del proceso de secado utilizando el invernadero fue realizada durante los meses de junio a agosto (invierno), considerando así las condiciones más críticas para procesos que utilizan energía solar. El diseño experimental consistió en separar el lodo en diferentes capas de espesor (5, 10 y 15 cm) en cajas de 40×60 cm, realizar la mezcla manual tres veces por semana y determinar semanalmente el contenido de humedad del lodo, expresado en base húmeda (%b.h.). A lo largo del trabajo, el término humedad aplicado al lodo se refiere a su contenido de humedad (%b.h.), mientras que cuando se alude a condiciones ambientales se hace referencia a la humedad relativa del aire. Para la determinación del contenido de humedad del lodo se utilizó el método termogravimétrico 1050UY descrito en el Manual de Procedimientos Analíticos para Muestras Ambientales (DINAMA, 2017).

Caracterización: Determinación del potencial agronómico del lodo seco

Con el objetivo de determinar el potencial de valorización de los lodos después del proceso de secado solar se realizaron una serie de ensayos fisicoquímicos y microbiológicos. La Tabla 1 presenta los ensayos para determinar el potencial de valorización agronómica. En cada análisis se realizaron dos ensayos por muestra reportándose el promedio de los resultados.

Tabla 1. Ensayos fisicoquímicos y microbiológicos para determinar el potencial de valorización agronómica

Parámetro	Unidad	Referencia	Laboratorio
Arsénico (As)	mgAs/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	ECOTECH en coordinación con NETUM
Cadmio (Cd)	mgCd/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	
Cobre (Cu)	mgCu/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	
Cromo (Cr)	mgCr/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	
Mercurio (Hg)	mgHg/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	
Níquel (Ni)	mgNi/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	
Plomo (Pb)	mgPb/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	
Zinc (Zn)	mgZn/kg	EPA 3051 A y EPA 6010 D	
Coliformes Fecales (CF)	NMP/g	APHA	

APHA: American Public Health Association. 5th Edition (2015)

EPA: United State Environmental Protection Agency.

Fuente: elaboración propia.

Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en cuanto a las condiciones climáticas experimentadas, el proceso de secado de los lodos, y su potencial de valorización agronómica. Los resultados se contrastan con la literatura para comparar su relevancia y aportes en esta área.

a) Condiciones climáticas durante el período de secado

El proceso de secado solar de lodos depende de condiciones climáticas como la irradiancia solar, la humedad relativa y la temperatura del aire (Sorrenti et al., 2022). Para evaluar su efectividad en condiciones desfavorables, los ensayos se realizaron de junio a mediados de agosto, periodo caracterizado por bajas temperaturas y altas precipitaciones en Uruguay, lo que representa un desafío para el secado utilizando energía solar.

Las Figuras 1, 2 y 3 presentan la evolución diaria de los valores extremos y promedios de la temperatura (interna y externa), la humedad (interna y externa) y GHI. Metodológicamente, para filtrar las fluctuaciones momentáneas, los datos crudos se integraron primero en promedios horarios. A partir de estos datos, se extrajeron los valores máximos y mínimos horarios de cada día, así como el promedio general diario. Adicionalmente, la Figura 4 detalla el perfil horario del día con mayor gradiente térmico entre el interior y exterior.

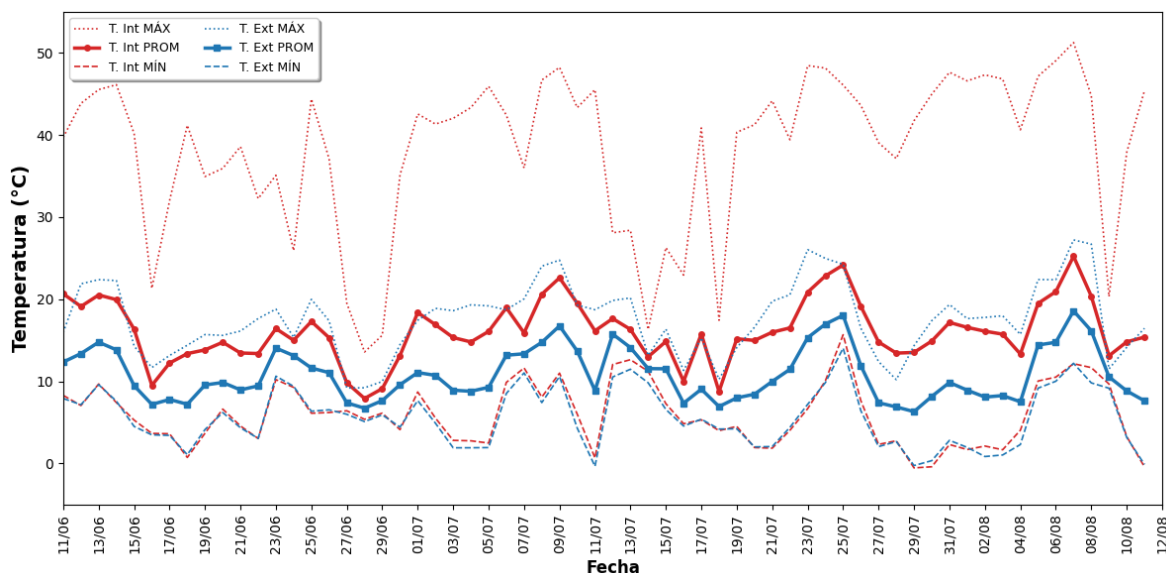


Figura 1. Valores mínimos, máximos y promedios diarios de la temperatura interna y externa.

Fuente: Elaboración propia

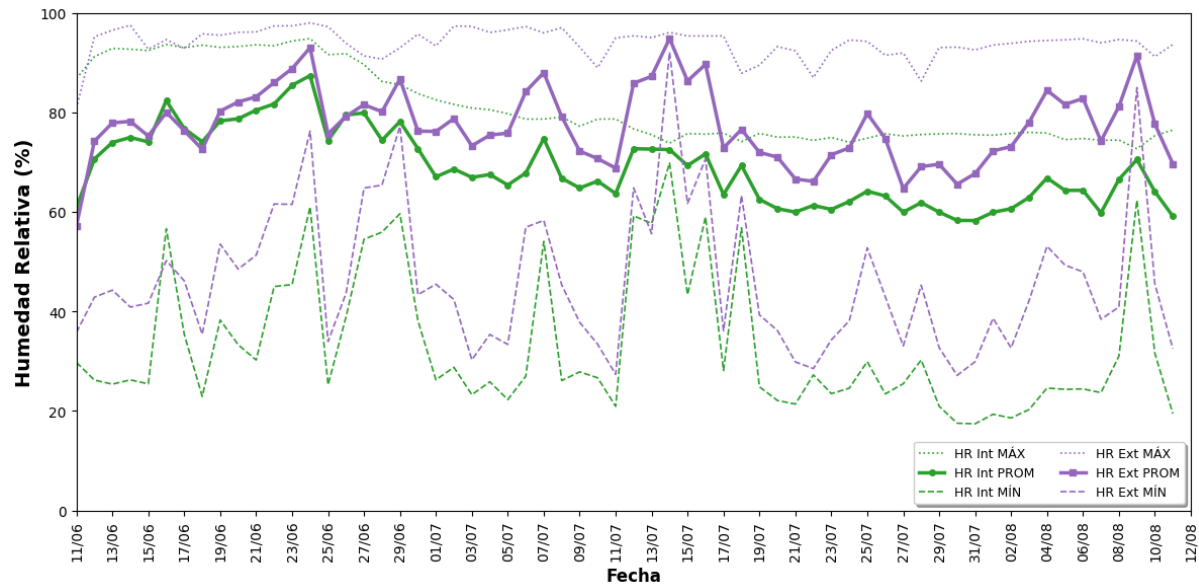


Figura 2. Valores mínimos, máximos y promedios diarios de la humedad interna y externa.

Fuente: Elaboración propia

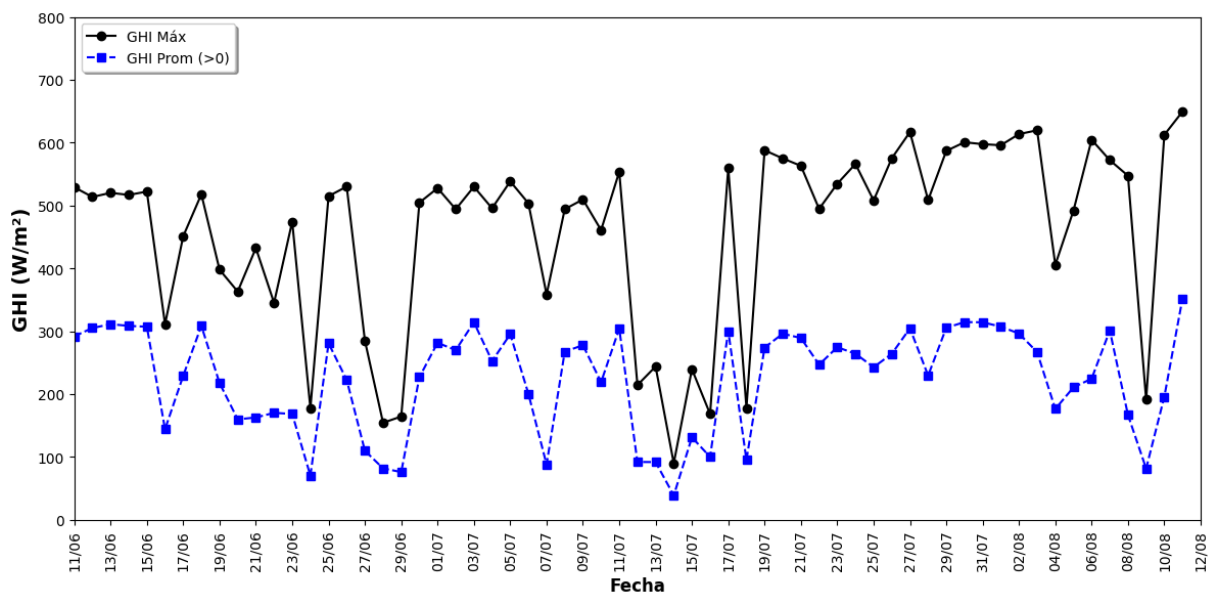


Figura 3. GHI máximo y promedio para valores mayores a cero.

Fuente: Elaboración propia

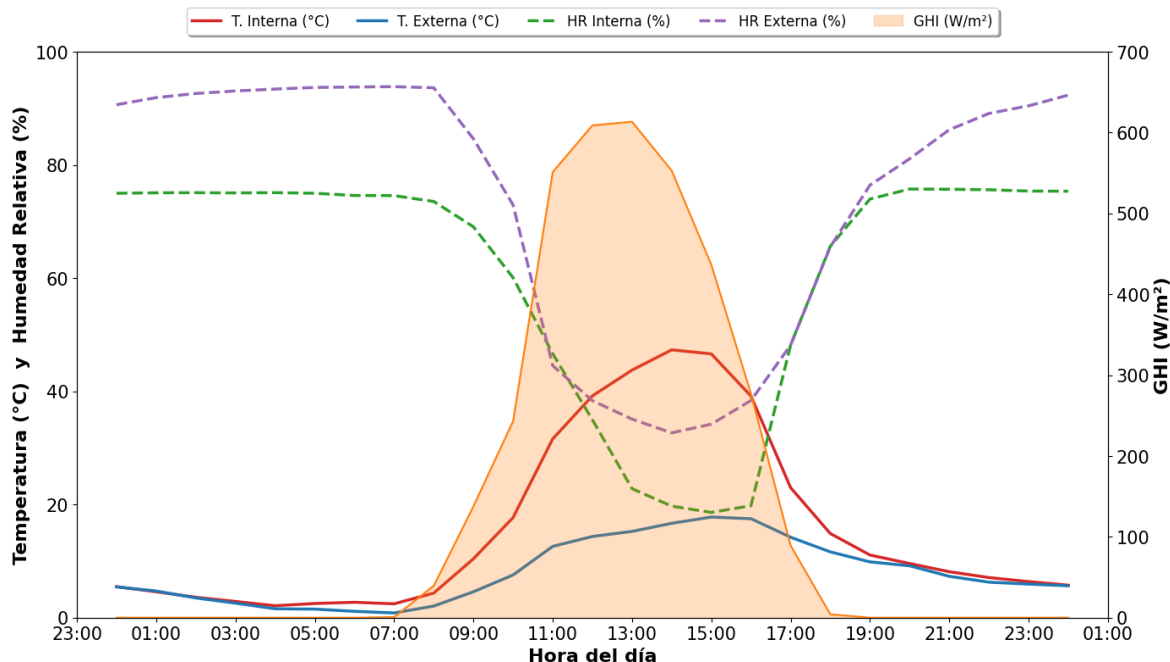


Figura 4. Evolución horaria de la temperatura, la humedad (interna y externa) y la GHI durante el día de mayor gradiente térmico entre el interior y exterior del invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Según los datos presentados en la Figura 1, las temperaturas registradas en el exterior del invernadero variaron en el período de estudio, entre un mínimo de aproximadamente 0°C y un máximo de 27,5°C. En el interior del invernadero, la temperatura máxima alcanzó los 51°C, mientras que la mínima fue similar a la del exterior (0°C). Los picos de temperatura, tanto en el interior como en el exterior, coincidieron temporalmente, alcanzando sus valores más altos, entre las 12h y las 15h, cuando la irradiancia solar es elevada.

Como se aprecia en la Figura 2, la humedad relativa del interior del secador muestra un comportamiento sincrónico con el exterior, lo que confirma la influencia de las condiciones climáticas sobre el sistema. No obstante, los valores mínimos promedios internos resultan sistemáticamente inferiores a los externos, descendiendo hasta un 20-25% en los días de mayor irradiancia solar y temperatura. Esta reducción se explica por el calentamiento del aire, al aumentar la temperatura interior respecto a la exterior, la humedad relativa disminuye, favoreciendo el potencial de secado, principalmente en las horas centrales del día. En la noche la humedad interior se acerca a la exterior, alcanzando valores de aproximadamente un 90%.

En la Figura 3 se presentan los valores de GHI máximo y promedio. El análisis de la GHI revela un máximo diario de aproximadamente 650 W/m^2 , estableciendo el límite superior del recurso durante el periodo. Sin embargo, al considerar exclusivamente las horas donde el GHI es superior a cero, el valor promedio del período evaluado desciende a 255 W/m^2 . Estos valores reducidos reflejan el recurso solar característico de la estación del año.

La Figura 4 ilustra el comportamiento durante el día de mayor gradiente térmico, alcanzando una diferencia máxima entre el interior y el exterior de $30,65 \text{ }^\circ\text{C}$ a las 14h. Los datos corroboran que los picos de temperatura se sincronizan con los periodos de mayor radiación solar (12-15h) y con los mínimos de humedad relativa.

Estos resultados se encuentran en línea con estudios previos realizados en invernaderos solares para el secado de lodos. Bux et al. (2002) evaluaron un secador solar comercial en Alemania, donde se registraron temperaturas internas diarias entre 9 y $23 \text{ }^\circ\text{C}$, irradiancias solares entre 45 y 367 W/m^2 y valores de humedad relativa comprendidos entre 40% y 100% . Asimismo, Salihoglu et al. (2007) estudiaron un invernadero en Turquía que lograba mantener una temperatura interna promedio de $11 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por encima de la exterior, gracias a la utilización de colectores solares y un lecho de roca subterráneo, permitiendo un secado eficiente en condiciones climáticas diversas. Por su parte, Kürklü et al. (2003), también en Turquía, reportaron valores de GHI del orden de 600 W/m^2 e identificaron que el uso de un lecho de rocas en combinación con un sistema de doble cubierta podía mantener una diferencia térmica de entre 6 y $9 \text{ }^\circ\text{C}$ entre el aire interior y exterior durante la noche, prolongando el efecto invernadero y reduciendo la necesidad de calefacción adicional.

b) Proceso de secado

Al inicio del proceso de secado, el lodo presentaba un contenido de humedad del 83% (b.h.). Tras 30 días de secado, la caja con un espesor de 5 cm redujo su contenido de humedad al 8% , mientras que las cajas con espesores de 10 y 15 cm alcanzaron valores del 6% y 54% de humedad, respectivamente, en un período de 60 días. Estos resultados demuestran la influencia del espesor de la capa de lodo en el tiempo necesario para el secado, destacando que espesores mayores requieren períodos significativamente más prolongados para alcanzar contenidos de humedad reducidos. En particular, el elevado contenido de humedad observado para el espesor de 15 cm puede atribuirse a limitaciones en la transferencia de masa y a la formación de gradientes internos de humedad, donde la capa superficial seca actúa como barrera para la evaporación del agua retenida en las capas inferiores, fenómeno ampliamente reportado

en procesos de secado de lodos y materiales húmedos (Sorrenti et al., 2022; Salihoglu et al., 2007).

Asimismo, la frecuencia de mezclado aplicada podría no haber sido suficiente para favorecer una homogeneización efectiva en capas de mayor espesor. En este contexto, la selección del espesor del lodo a secar debe considerar un balance entre el espacio disponible, el tiempo de secado, la capacidad del invernadero y el contenido de humedad requerido para su aplicación final, tal como se ha señalado en estudios previos sobre secado solar de lodos (Sorrenti et al., 2022).

En un estudio realizado en Komotini (Grecia), Mathioudakis et al. (2009) realizaron el secado solar de lodos secundarios provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal, previamente deshidratados con un filtro de banda. Los experimentos se llevaron a cabo en un invernadero de policarbonato equipado con un sistema de almacenamiento de energía solar. Los lodos, dispuestos en cajas con una profundidad de 20 a 25 cm, eran mezclados manualmente a diario para garantizar una distribución uniforme del calor. Durante el verano, la humedad de los lodos se redujo del 85% al 6% en un periodo de 7 a 12 días, con temperaturas internas entre 35 y 60 °C. En otoño, la humedad disminuyó al 10% en un lapso de 9 a 33 días, siendo el descenso de la temperatura ambiente (hasta 2 °C) un factor determinante en el aumento del tiempo requerido para el secado.

Bux et al. (2002), evaluaron un secador solar comercial para el secado de lodos municipales en Alemania. Los lodos fueron digeridos aeróbicamente y presentaban un contenido inicial de humedad del 97%. Estos fueron colocados en una cámara de secado dividida en dos compartimentos idénticos de 150 m² cada uno, con capas de entre 20 y 50 cm de espesor. En uno de los compartimentos se aplicó un floculante orgánico (polímero de poliacrilamida) para comparar los resultados de secado con y sin tratamiento de floculación. Los lodos fueron mezclados automáticamente mediante un robot. La temperatura diaria en el invernadero oscilaba entre 9 y 23°C. Los resultados mostraron que los lodos sin tratamiento de floculación alcanzaron una concentración final de sólidos secos del 93% en 83 días, mientras que con el floculante este tiempo se redujo a 64 días.

Un experimento llevado a cabo por Sorrenti et al. (2022) en Palermo, Italia, evaluó el secado de lodos espesados generados durante el tratamiento de aguas residuales municipales, los cuales presentaban una humedad inicial del 97%. El invernadero solar, a escala piloto, tenía una superficie de 0,62 m² y contaba con un sistema de ventilación forzada que proporcionaba aire caliente a través de un panel solar aero-térmico y un techo transparente de policarbonato. Durante el experimento, los lodos se distribuyeron en una capa de 16,5 cm de espesor sobre una base de grava y arena, sin mezclarse durante el proceso de secado. Los resultados demostraron una notable reducción de la

humedad, del 97% al 5%, en un periodo de 25 días, con temperaturas internas que se mantuvieron constantes en alrededor de 37°C.

A diferencia de estudios previos desarrollados en climas semiáridos o en estaciones con condiciones más favorables para el secado solar, el presente trabajo aporta evidencia experimental generada en un contexto climático templado-húmedo y durante el invierno, característico del Uruguay. Este enfoque permite evaluar la viabilidad de la tecnología en un escenario conservador, evitando comparaciones numéricas directas con ensayos realizados bajo condiciones climáticas significativamente distintas.

En este sentido, se prevé que el desempeño del sistema pueda mejorar en las demás estaciones del año, donde se registran mayores niveles de irradiancia solar y temperaturas ambientales, aspecto que será abordado en futuros estudios.

c) Potencial de valorización agronómica del lodo seco

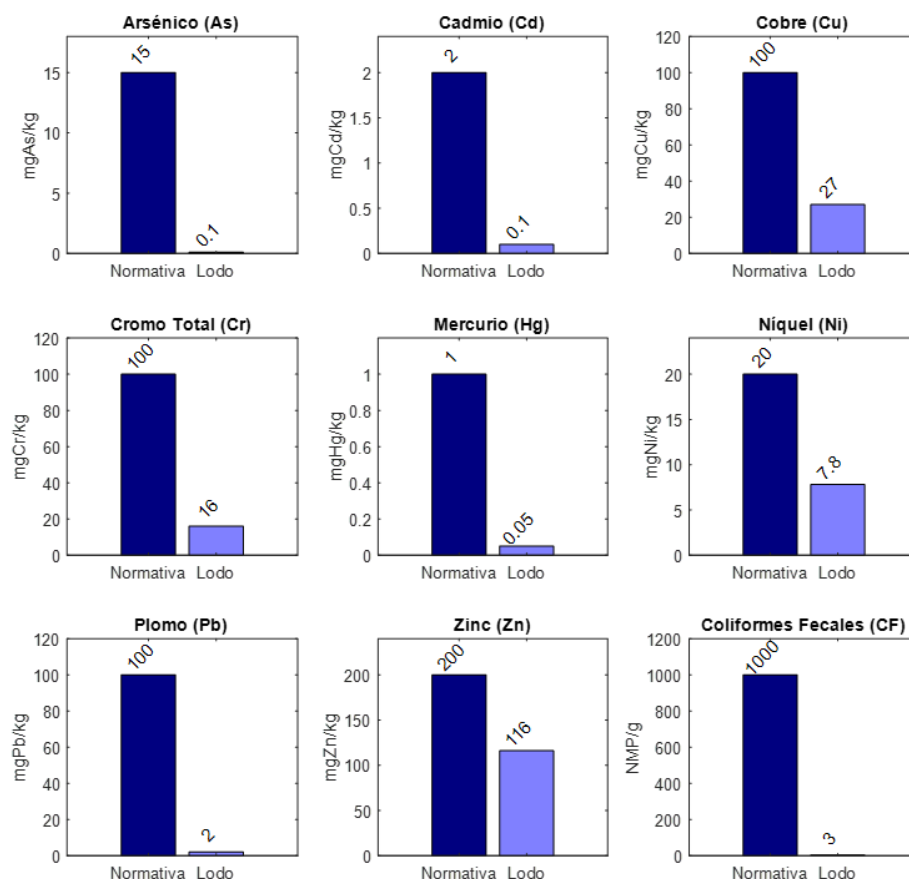


Figura 5. Comparación de las propiedades del lodo seco con los criterios técnicos de la Resolución n°141/018 para metales pesados y coliformes fecales.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5 presenta un análisis comparativo entre las propiedades del lodo seco obtenido en este estudio y los criterios técnicos establecidos por la Resolución n° 141/018 en cuanto a los metales pesados y coliformes fecales.

Antes de iniciar el proceso de secado, el lodo ya cumplía con los requisitos normativos de Uruguay en cuanto a coliformes fecales y metales pesados para su uso agrícola. Sin embargo, los objetivos del estudio se abordaron de manera diferente para cada parámetro. En el caso de los metales pesados, el propósito fue verificar si, tras el secado solar, el lodo cumplía con los límites establecidos por la normativa, ya que estos se analizaron únicamente al final del proceso y no se consideró la posibilidad de cambios en su concentración debido al tratamiento térmico. Por otro lado, en lo que respecta a los coliformes fecales, además de comprobar el cumplimiento de la normativa, se evaluó específicamente si el proceso de secado solar era capaz de reducir su concentración, con el fin de explorar el potencial de este método como una opción viable para la higienización microbiológica del lodo.

En razón de ser un lodo fisicoquímico de una industria del rubro alimentación, inicialmente presentó una baja concentración de coliformes fecales, con 74 NMP/g. Al cabo de 2 meses de secado, esta concentración se redujo a menos de 3 NMP/g, lo que equivale a una disminución del 96%. Esta reducción se atribuye a las elevadas temperaturas alcanzadas dentro del prototipo (51°C) durante los periodos de máxima irradiancia solar, así como al bajo contenido de humedad del lodo (8%). Según Paluszak et al. (2012), las altas temperaturas junto con la disminución del contenido de humedad favorecen la reducción de microorganismos patógenos.

Shanahan et al. (2010), evaluaron el potencial del secado solar en la desinfección de lodos mediante indicadores de contaminación fecal, como coliformes fecales, coliformes totales y bacteriófagos. Después de 12 días de secado, se realizó un análisis para determinar la presencia o ausencia de estos. Aunque los coliformes fecales aún estaban presentes al finalizar el proceso, los enterovirus, parásitos y *Salmonella* spp. fueron eliminados por completo tras el período de secado.

El estudio realizado por Cota-Espericueta y Ponce-Corral en 2008 también demuestran el potencial del secado solar en la higienización de los lodos. Los resultados presentan una reducción en la concentración de coliformes fecales de $3,8 \times 10^6$ NMP/g a 1,6 NMP/g, representando una disminución del 99,99% en aproximadamente 11 días. La humedad final de los lodos analizados era de 6,67% y la temperatura máxima alcanzada en el interior del invernadero fue de 70°C durante el periodo evaluado.

Belloulid et al. (2019) llevaron a cabo un estudio en Marrakech, Marruecos, en un clima semiárido, utilizando un invernadero de policarbonato. Los resultados mostraron que las altas temperaturas registradas durante el verano permitieron una reducción

significativa de los coliformes fecales y totales, logrando una disminución del 96%. Sin embargo, durante el ciclo de secado en invierno, la eficiencia para eliminar patógenos fue menor, alcanzando una reducción del 60%.

Basado en el estudio de Paluszak et al. (2012), se demostró que la utilización de fuentes de calor adicionales puede mejorar significativamente la eliminación de patógenos durante los meses de invierno. En este estudio, realizado en una planta de secado solar en Polonia, se utilizó un sistema de calefacción en el suelo que complementaba la irradiancia solar. Este sistema generaba calor mediante una bomba de calor que recuperaba energía del agua residual tratada, lo que ayudaba a mantener temperaturas elevadas y facilitaba la evaporación del agua en los lodos. Gracias a esta combinación de tecnologías se logró la reducción de patógenos de aproximadamente 91%.

Otra práctica que, según An-nori et al. (2022), generó resultados positivos fue el encalado previo a la deshidratación mecánica y al secado solar, logrando una reducción superior al 99% de coliformes fecales y totales. Por lo tanto, la combinación de cal y el efecto invernadero se muestra como una estrategia interesante para la eliminación de patógenos, especialmente en condiciones climáticas desfavorables, como las que se presentan durante el invierno.

En relación al comportamiento de los metales pesados, la literatura muestra que el proceso de secado solar no actúa como un mecanismo de eliminación directa de estos elementos. Sin embargo, se ha evidenciado que este proceso puede modificar la especiación de los metales, lo que reduce su disponibilidad. Estos cambios se atribuyen a la disminución del contenido de humedad y a las transformaciones en la materia orgánica. En efecto, con el aumento de la materia seca, los minerales amorfos tienden a transformarse en formas cristalinas más estables (An-nori et al., 2022).

Este fenómeno ha sido corroborado por los resultados de An-nori et al. (2020a), quienes evaluaron la especiación de metales pesados en un clima semiárido. En su estudio, observaron que el níquel, que inicialmente se encontraba mayoritariamente en la fracción reducible (43,7%) en el lodo deshidratado mecánicamente, pasó a estar principalmente en la fracción residual tras el secado solar (55%). Del mismo modo, el cromo, el cobre y el plomo, que al inicio estaban ligados a la fracción oxidizable (80%, 70% y 80%, respectivamente), se encontraron en su forma residual después de 45 días de secado solar, con proporciones del 78%, 73% y 71%, respectivamente.

Con los resultados obtenidos en este estudio y respaldados por la literatura, se infiere que el lodo evaluado tiene potencial para su uso en la agricultura. No obstante, es fundamental cumplir con todos los parámetros establecidos en la normativa anteriormente mencionada, para ser registrado como enmienda orgánica en Uruguay.

Además, si se destina a este propósito, el proceso de secado solar podría optimizarse, ya que el contenido de humedad requerido para el registro oscila entre el 20% y el 45%. Esto permitiría reducir tanto el tiempo de secado como los costos asociados y el espacio necesario en el invernadero.

Conclusión

Los resultados de este estudio destacan el secado solar como una alternativa potencialmente viable para el tratamiento de lodos, incluso cuando el proceso se desarrolla durante el período invernal, bajo condiciones climáticas desfavorables para este tipo de sistema. Este método no solo reduce significativamente el volumen de este residuo, facilitando su gestión y disminuyendo costos de transporte y disposición final, sino que también agrega valor al transformar un residuo en un recurso con aplicaciones potenciales en la agricultura, alineándose con los principios de la economía circular y algunos de los ODS.

Desde el punto de vista operativo, el secado solar en invernadero permitió alcanzar temperaturas internas significativamente superiores a las ambientales, incluso durante el período invernal, con valores máximos del orden de 51 °C durante los períodos de mayor irradiancia. Estas condiciones favorecieron una reducción sustancial del contenido de humedad del lodo, alcanzando valores finales del 8 % y 6 % para capas de 5 y 10 cm, respectivamente, mientras que espesores mayores presentaron tiempos de secado más prolongados. Asimismo, el proceso contribuyó a la reducción de la carga microbiológica, evidenciada por una disminución del 96 % en la concentración de coliformes fecales. En cuanto a la composición química, los análisis realizados al finalizar el proceso indicaron que ninguno de los metales pesados evaluados presentó concentraciones superiores a los límites establecidos por la normativa uruguaya vigente para su uso agrícola.

Si bien los resultados obtenidos permiten afirmar que el lodo seco presenta potencial para su valorización agronómica, el alcance del estudio se limita a un análisis preliminar a escala piloto y a un conjunto acotado de parámetros. En particular, no se evaluaron propiedades agronómicas específicas asociadas a su aplicación en suelos locales, como el aporte de nutrientes, la interacción con distintos tipos de suelo o la respuesta de cultivos representativos de la región. En este contexto, resulta necesario complementar los resultados obtenidos con estudios orientados a las características edáficas y productivas locales, así como a la evaluación del desempeño del sistema bajo otras condiciones climáticas, particularmente durante el período estival.

En este contexto, el secado solar no solo aborda desafíos ambientales, sino que también posibilita la reutilización y el aprovechamiento eficiente de los recursos, contribuyendo a un modelo de economía más sostenible y circular.

Referencias

Alonso-Suárez, R., Abal, G., Musé, P., & Siri, R. (2014). Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. *Energy Procedia*, 57(1237-1246), 2013.

Alonso-Suárez, R. (2017). Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales.

An-nori, A., Ezzariai, A., El Mejahed, K., El Fels, L., El Gharous, M., & Hafidi, M. (2022). Solar drying as an eco-friendly Technology for sewage sludge stabilization: Assessment of micropollutant behavior, pathogen removal, and agronomic value. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 814590.

An-nori, A., El Fels, L., Ezzariai, A., El Gharous, M., ElMejahed, K., and Hafidi, M. (2020a). Effects of Solar Drying on Heavy Metals Availability and Phytotoxicity in Municipal Sewage Sludge under Semi-arid Climate. *Environ. Tech. Innovation* 19, 101039. doi:10.1016/j.eti.2020.101039

Belloulid, M. O., Hamdi, H., Mandi, L., & Ouazzani, N. (2019). Solar drying of wastewater sludge: a case study in Marrakesh, Morocco. *Environmental Technology*, 40(10), 1316–1322. <https://doi-org.proxy.timbo.org.uy/10.1080/09593330.2017.1421713>.

Bose S. y Bhattacharyya A.K. (2008). Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. *Chemosphere* 70, 1264–1272.

Bux, M., Baumann, R., Quad, S., Pinnekamp, J., & Mühlbauer, W. (2002). Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying. *Drying Technology*, 20(4-5), 829-837.

DINAMA (2017). Método 1050UY: Determinación de humedad en muestras sólidas (residuos sólidos industriales, sedimentos, suelos). Manual de Procedimientos Analíticos para Muestras Ambientales. Versión 1. División Laboratorio Ambiental, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Uruguay.

Díaz, R. (1994). Cambios en el largo plazo en el carbono y nitrógeno del suelo bajo rotación de cultivos con pasturas de leguminosas. En A. Morón, W. E. Baethgen, & R. M. Díaz Rossello (Eds.), *Materia orgánica en la rotación cultivo-pastura* (pp. 10–12). INIA. Serie Técnica No. 41.

García de Souza, M., Alliaume, F., Mancassola, V., & Dogliotti, S. (2011). Carbono orgánico y propiedades físicas del suelo en predios hortícolas del sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15(1), 70–81.

Gilsanz, J. C., Leoni, C., Schelotto, F., & Acuña, A. (2013). Uso potencial de los lodos urbanos en la producción agrícola. *Agrociencia Uruguay*, 17(2), 1–10.

Sorrenti, A., Corsino, S. F., Traina, F., Viviani, G., & Torregrossa, M. (2022). Enhanced Sewage Sludge Drying with a Modified Solar Greenhouse. *Clean Technologies*, 4(2), 407–419.

Cota-Espericueta, A. D., & Ponce-Corral, C. (2008). Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(4), 161–170.

Sahlströma L., Aspana A., Baggea E., Danielsson–Thamb M.L. y Albihna A. (2004). Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Res.* 38, 1989–1994.

Shanahan, E. F., Roiko, A., Tindale, N. W., Thomas, M. P., Walpole, R., and Kurtböke, D. İ. (2010). Evaluation of Pathogen Removal in a Solar Sludge Drying Facility Using Microbial Indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 7, 565–582. doi:10.3390/ijerph7020565.

Paluszak, Z., Skowron, K., Sypuła, M., and Skowron, K. J. (2012). Microbiological Evaluation of the Effectiveness of Sewage Sludge Sanitization with Solar Drying Technology. *Int. J. Photoenergy* 2012, 1–11. doi:10.1155/2012/341592.

Mathioudakis, V. L., Kapagiannidis, A. G., Athanasoulia, E., & Diamantis, V. I. (2009). Extended dewatering of sewage sludge in solar drying plants. *Desalination*, 248(1–3), 733–739. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.06.034>.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (2018). *Resolución N° 141/018: Requisitos técnicos para el registro de enmiendas orgánicas*. Diario Oficial, 30.066. Recuperado de https://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/Resolucion_141_018.pdf

Freitas, V. O. de, Rola, M. C., & Liesenfeld, K. A. (2022). Diseño, Construcción y Evaluación de un Secador Solar Tipo Invernadero Aplicado al Secado de Lodos. Anais Congresso Brasileiro De Energia Solar - CBENS, 1–9. <https://doi.org/10.59627/cbens.2022.1133>.

Kürklü, A., Bilgin, S., & Özkan, B. (2003). A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renewable Energy*, 28(5), 683-697.

Salihoglu, N. K., Pinarli, V., Salihoglu, G., 2007. Solar drying in sludge management in Turkey, *Renewable energy*, 32(10), 1661-1675.

Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y Gobierno del Uruguay. (2024). *Estrategia Nacional de Economía Circular del Uruguay: Acciones para la transformación del sistema de producción y consumo del país* (Documentos de Proyectos, LC/TS.2024/77). Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Ministerio de Ambiente. (2021). Uruguay + Circular: Plan Nacional de Gestión de Residuos 2022 - 2032. Recuperado de <https://www.ambiente.gub.uy/oan/residuos/residuos/>.

Vávrová, K., Králík, T., Janota, L., Šolcová, O., Čárský, M., Soukup, K., & Vítek, M. (2023). Process economy of alternative fuel production from sewage sludge and waste celluloses biomass. *Energies*, 16(1), 518. <https://doi.org/10.3390/en16010518>.

Huber Technology. (2024). *Solar dryers are in demand worldwide, even for big and medium-sized wastewater treatment plants*. Huber Report. Recuperado el 05 de agosto de 2024, de <https://www.huber-technology.com/huber-report/ablage-berichte/sludge-treatment/solar-dryers-are-in-demand-worldwide-even-for-big-and-medium-sized-wastewater-treatment-plants.html>.

Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. Banco Mundial.