

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

Tesis de Maestría

Estimación teórica del potencial de biogás por co-digestión anaeróbica
de los RSO y aguas residuales de la UABC, campus Mexicali I

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Presenta:

Ing. Daniel Alfredo Ortiz Torres

Dirigido por:

Dr. Ricardo López Zavala

Dra. Mydory Oyuky Nakasima López

Mexicali B.C., México a junio de 2024

DEDICATORIA

Esta tesis de maestría va dedicada con todo mi amor y cariño a mi familia, maestros y amigos, ya que, sin su apoyo, paciencia y enseñanzas, este recorrido de retos y aprendizajes, no hubiera sido una de las mejores etapas de mi vida.

“Si no es en esta vida,
quedan un millón de vidas más”
-Serbia

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis directores de tesis, el Dr. Ricardo López Zavala y la Dra. Mydory Oyuky Nakasima López, por la confianza y apoyo desde mi formación de licenciatura como la realización de esta tesis, ya que, sin su confianza y motivación, jamás hubiera imaginado que yo realizaría un posgrado y mucho menos superarme de manera personal, desde siempre ver una oportunidad aun en los peores momentos y siempre ver el lado bueno de las cosas. Muchas gracias por hacerme ver más allá de las limitaciones.

A mi familia, por ser una parte fundamental en mi vida; mi madre por siempre estar ahí para mí y darme todo para que no me faltara nada, a mis abuelos por darme su amor, motivación y apoyo en cada etapa de mi crecimiento, porque sin ustedes yo no sería nada en esta vida, a mis tíos por sumar experiencias y recuerdos que atesoro con mucho amor y mostrarme lo inmenso de este mundo, a mis primos por ser la alegría de mi vida y por supuesto a mis hermanos, que son mi motivación de cada día.

A mis amigos y colegas del Instituto de Ingeniería, por compartir conmigo conocimiento nuevo y por supuesto, tantos momentos increíbles.

Al Dr. Nicolás Velázquez Limón, por ser un docente como ninguno, que contagia su amor por saber y conocer todo lo que nos rodea, por el apoyo en la iniciativa de muchos estudiantes ya que sin esas cualidades jamás hubiera llegado al área en el que hoy en día me estoy especializando, haciéndome conocer docentes igual de increíbles que siguen sumando a mi desarrollo.

A la Dra. Sara Ojeda Benites, Dra. Luz del Consuelo Olivares Fong y la M.I Luz Estela Salazar Escalante, por su valiosa presencia, comentarios, cuestionamientos, dudas y apoyo durante toda esta investigación.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, al laboratorio de Residuos Sólidos y al Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER), por el apoyo dado para realizar y terminar este proyecto de investigación.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado para la realización de esta tesis.

A todos ustedes, muchas gracias por todo.

RESUMEN

Este estudio consiste en estimar teóricamente el potencial energético que tienen los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales que se generan en el campus Mexicali I de la UABC, a través de un proceso de co-digestión anaeróbica; con la finalidad de proponer una gestión integral y sostenible de los residuos orgánicos de la universidad.

Durante los dos ciclos escolares del año 2023, se empleó un método sistemático y un método aleatorio simple para el muestreo de Residuos de Alimentos (RA) de la cafetería universitaria y de las aguas residuales domésticas (ARD) de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la UABC, respectivamente. Se tomaron 34 muestras (1 por semana) y se recolectaron en total 220 kg de RA de la cafetería. Se estimó una generación diaria promedio de 6.47 kg de RA y que durante el año escolar se generaron 1,035 kg de RA. Las muestras recolectadas semanalmente de RA y ARD se analizaron fisicoquímicamente de manera individual y en diferentes proporciones RA/ARD de 25%/75%, 50%/50% y 75%/25%. Se encontró que la relación de 25%/75%, presentó un porcentaje de humedad, ST, SV y SF de 95.28%, 4.71%, 90.42% y 9.58%, respectivamente; un pH de 4.71, un DQO de 106,702.63 mg/L y una relación promedio de C/N de 12.62. Con la Co-DA 25%/75% se tiene la mayor generación de biogás siendo de 5.73 m³/día equivalente a 872 m³ al año, un potencial de metano 3.73 m³/día y 567 m³ anual y un potencial eléctrico de 118.46 m³/día equivalente a 18015 m³/año. Por otra parte, se encontró que la Co-DA de los RA y ARD no modificó las características fisicoquímicas de los RA, por lo que el ARD puede ser utilizada para la dilución de los RA reduciendo significativamente los servicios de agua potable que requiere el proceso de Co-DA y así tratar dos residuos de manera simultánea.

Este proyecto permite establecer las bases para gestionar de manera correcta e integral los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales; lo que puede traer ahorros económicos, y beneficios ambientales y sociales a la comunidad universitaria. Además de posicionar a la UABC como una institución responsable con el medio ambiente, al implementar estrategias sustentables basadas en el modelo de economía circular, y así brindar un tratamiento eficiente a sus residuos orgánicos.

ABSTRACT

This project consists of theoretically estimating the energy potential of organic solid waste and wastewater generated by the Mexicali campus of the UABC, through the production of biogas for an anaerobic co-digestion process.

During the two school cycles of the year 2023, a systematic method and a simple random method were used for the sampling of Food Waste (FR) from the university cafeteria and domestic wastewater (DWW) from the UABC Wastewater Treatment Plant (WWTP), respectively. Thirty-four samples were taken (1 per week) and a total of 220 kg of AR from the cafeteria were collected. An average daily generation of 6.47 kg of AR was estimated and that 1,035 kg of AR were generated during the school year. The weekly collected samples of AR and ARD were analyzed physicochemically individually and at different AR/ARD ratios of 25%/75%, 50%/50% and 75%/25%. It was found that the 25%/75% ratio, presented a percentage of moisture, ST, SV and SF of 95.28%, 4.71%, 90.42% and 9.58%, respectively; a pH of 4.71, a COD of 106,702.63 mg/L and an average C/N ratio of 12.62. With the Co-DA 25%/75%, the highest biogas generation was 5.73 m³/day equivalent to 872 m³/year, a methane potential of 3.73 m³/day and 567 m³/year, and an electrical potential of 118.46 m³/day equivalent to 18015 m³/year. On the other hand, it was found that the Co-DA of AR and ARD did not modify the physicochemical characteristics of AR, so ARD can be used for dilution of AR, significantly reducing the potable water services required by the Co-DA process and thus treating two wastes simultaneously.

This project establishes the basis for the correct and comprehensive management of organic solid waste and wastewater, achieving economic, environmental and social benefits for the university community. In addition to positioning the UABC as an environmentally responsible institution, by implementing sustainable strategies based on the circular economy model, and thus providing an efficient treatment of its organic waste.

Índice

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	ix
Nomenclatura	xi
CAPÍTULO 1 Introducción	1
1.1 Problemática y justificación	1
1.2 Antecedentes	4
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo General	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
1.4 Metodología	12
CAPITULO 2 Fundamentos teóricos	13
2.1 Biomasa	13
2.1.1 Ciclo de la biomasa	13
2.1.2 Tipos de biomasa	14
2.1.3 Disponibilidad biomasa en México	16
2.1.4 Tipos de aprovechamientos energéticos de la biomasa	16
2.2 Metodologías de muestreo de RA y aguas residuales	17
2.3 Métodos de muestreo estadístico	18
2.4 Análisis estadísticos de generación de alimentos y de parámetros fisicoquímicos	19
2.5 Digestión y co-digestión anaeróbica para producción de biogás	20
2.6 Definición de parámetros fisicoquímicos de los RSO y aguas residuales	22
CAPITULO 3 Análisis y discusión de resultados	26
3.1 Metodología de estudio	26
3.2 Resultados de caracterización fisicoquímica de RA y aguas residuales	42
3.3 Análisis estadístico de los resultados	54
3.4 Estimación teórica de producción de biogás	59
3.5 Conclusiones y recomendaciones	65
REFERENCIAS	67

ANEXO A	77
ANEXO B	79
ANEXO C	90

Lista de figuras

Figura 1: Ciclo de la biomasa.....	14
Figura 2: Proceso de la digestión anaeróbica.....	20
Figura 3: Metodología general para el estudio de la biomasa para su aprovechamiento en un proceso de co-digestión anaeróbica.	26
Figura 4: Ubicación del Centro Comunitario Estudiantil del Campus Mexicali I y la PTAR en unidad deportiva del mismo complejo.....	28
Figura 5: Calendario de muestreo 2023-1/2023-2.....	34
Figura 6: Entrega de contendedores a locatarios para muestreo de RA.....	35
Figura 7: Recolección de RA en cubetas trasladados a laboratorio.....	36
Figura 8: Etiquetado de frascos de AR.....	36
Figura 9: Retirando plástico del RA.	37
Figura 10: Retirando papel del RA.....	37
Figura 11: Pesaje de Lechuga Romana.....	38
Figura 12: Separación de RSO por grupos.....	38
Figura 13: Etapas de pre-tratamiento del RA.....	39
Figura 14: Almacenamiento de RA a 0 C para preservación de parámetros fisicoquímicos.....	39
Figura 15: Generación de RA en 2023-1.....	43
Figura 16: Generación RA en 2023-2.....	44
Figura 17: Composición de RA en 2023-1.....	44
Figura 18: Composición de RA en 2023-2.....	45
Figura 19: Densidad anual de los RA, AR y sus co-digestiones.....	48
Figura 20: Porcentaje de humedad de los RA, AR y sus co-digestiones.....	48
Figura 21: Porcentaje de Sólidos Totales de los RA, AR y sus co-digestiones.....	50
Figura 22: Porcentaje de Sólidos Volátiles de los RA, AR y sus co-digestiones.....	51
Figura 23: Demanda química de oxígeno de los RA, AR y sus co-digestiones.....	52
Figura 24: Cálculo de Potencial de biogás a partir de los RA, ARD y Co-Das, Caso 1.....	61
Figura 25: Cálculo del Potencial de biogás a partir de los RA, ARD y Co-DAs, Caso 2.....	62
Figura 26: Cálculo de potencial de metano, Caso 1.....	62
Figura 27: Cálculo de potencial de metano, Caso 2.....	63
Figura 28: Cálculo de potencial energético, Caso 1.....	63
Figura 29: Cálculo de potencial energético, Caso 2.....	64

Lista de tablas

Tabla 1.- Estudio sobre co-digestión de diferentes RO y su potencial de metano	9
Tabla 2.- Horario de operadores de la PTAR	30
Tabla 3.-Dias de muestreo para RA por el método sistemático del semestre 2023-1.....	31
Tabla 4.-Dias de muestreo para RA por el método sistemático del semestre 2023-2.....	32
Tabla 5.- Días de muestreo para aguas residuales por el método aleatorio simple del semestre 2023-1 y 2023-2.	33
Tabla 6.- Parámetros de análisis fisicoquímicos de los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales.	40
Tabla 7.-Cantidad de muestreo para diferentes valores de error.	42
Tabla 8.- Clasificación de RA muestreado en Periodo 2023-1 y 2023-2.	45
Tabla 9.- Nomenclatura a utilizar para interpretación de gráficas y tablas.	47
Tabla 10.- Relación CARBONO: NITRÓGENO (C:N) para los RA, AR y sus co-digestiones.....	52
Tabla 11.- pH de los dos ciclos escolares para los RA, AR y sus co-digestiones.....	53
Tabla 12.- Nivel de variabilidad en función del coeficiente de variación	54
Tabla 13.- Análisis estadístico para la generación de RA del centro comunitario.....	55
Tabla 14.-Análisis de sólidos para los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.	56
Tabla 15.- Análisis de parámetros químicos de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.....	57
Tabla 16.- Resultados de la caracterización fisicoquímica.....	59
Tabla 17.- Cálculo anual de potencial de biogás, metan y energético.....	64
Tabla A.1.- Composición del RA del ciclo 2023-1.....	77
Tabla B.1.- Densidad de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.....	79
Tabla B.2.- Porcentaje de humedad de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.....	80
Tabla B.3.- Porcentaje de Sólidos Totales de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.	81
Tabla B.4.- Porcentaje de Sólidos Fijos de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.	82
Tabla B.5.- Porcentaje de Sólidos Volátiles de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.....	83
Tabla B.6.- Cantidad de Sólidos Totales de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.	84
Tabla B.7.- Cantidad de Sólidos Totales Volátiles de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones. 85	
Tabla B.8.- Cantidad de Sólidos Totales Fijos de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.	86
Tabla B.9.-Demanda Química de Oxígeno de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.	87
Tabla B.10.-Carbono Orgánico Total de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.	88
Tabla B.11.-Nitrógeno Total de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.....	89
Tabla C.1.- Potencial de Biogás de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 1.	90
Tabla C.2.- Potencial de Metano de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 1.	91

Tabla C.3.- Potencial Energético de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 1.....	92
Tabla C.4.- Equivalencias de masa y volumen de los residuos Caso 1.	93
Tabla C.5.- Potencial de Biogás de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 2.	94
Tabla C.6.- Potencial de Metano de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 2.	95
Tabla C.7.- Potencial Energético de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 2.....	96
Tabla C.8.- Equivalencias de masa y volumen de los residuos Caso 2.	97

Nomenclatura

SÍMBOLO	DEFINICIÓN/CONCEPTO	UNIDAD (SI APLICA)
RSO	Residuos sólidos orgánicos	-
RA	Residuos Alimentarios	-
ARD	Aguas Residuales Domésticas	-
DA	Digestión anaeróbica	-
UASB	Manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente/Upflow Anaerobic Sludge Blanket	-
CSTR	Reactor de mezcla completa/Continuous Stirred Tank Reactor	-
SV	Sólidos volátiles	mg/L
DQO	Demanda química de oxígeno	mg/L
CRO	Cantidad de residuo orgánico	kg/d
DRO	Densidad del residuo orgánico	kg/m ³
TRH	Tiempo de retención hidráulico	días u horas
RSU	Residuo sólido urbano	-
FC_{CH4}	Fracción de concentración del metano	Adimensional
DCH₄	Densidad del metano	g/L
CE_{CH4}	Contenido energético del metano	kJ/g
F_{BIOGÁS}	Factor de producción de biogás	m ³ /kg SV
P_{BIOGÁS}	Producción de biogás	m ³ /d
PCH₄	Producción de metano	m ³ /d
VAB	Volumen de almacenamiento de biogás	m ³
P_{ENER}	Producción de energía	kWh/d
FSVR	Fracción de sólidos volátiles en el residuo	Adimensional
FSVS	Fracción de sólidos volátiles en el sustrato	Adimensional
CMOVR	Cantidad de materia orgánica volátil en el residuo	kg SV/d
CSV	Concentración de sólidos volátiles en el sustrato	kg SV/m ³
DQOR	Demanda química de oxígeno del residuo	kg DQO/m ³

CAPÍTULO 1 Introducción

1.1 Problemática y justificación

A nivel mundial, la generación de residuos ha resultado ser proporcional al crecimiento poblacional e inherente a las actividades productivas, así como al consumo de bienes y servicios (Cohen, 2017). Por residuos se puede entender a un material que al consumirse o terminar su función, ya no tiene un propósito por el consumidor o empleador, lo que resulta en disponer de el por considerarse no útil o también dicho en otras palabras: “una parte o porción que queda de un todo” (Real Academia Española, 2023); sin embargo, también se entiende por residuo como el resultado que se desecha de un proceso o actividad cotidiana (Van Ewijk & Stegemann, 2020).

Los residuos se pueden encontrar en estado sólido, líquido y gaseoso. Los residuos sólidos (RS) pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica; los líquidos son aquellos que se vierten disueltos como parte de las aguas residuales; y los gaseosos son gases que se generan en distintos procesos y que se escapan hacia la atmósfera. Los residuos, en función de su composición, tasa de generación y manejo, pueden provocar diversos efectos nocivos en la sociedad y en el medio ambiente (Nawaz & Razzak, 2024).

Por otro lado, los RS se pueden clasificar en tres grandes grupos, como lo son los residuos sólidos urbanos (RSU), Residuos de Manejo Especial (RME) y Residuos Peligrosos (RP); independientemente de si son orgánicos o inorgánicos. Los RSU se constituyen de desechos generados en la mancha urbana por ejemplo de casas, empresas, escuelas, edificios, entre otros (Velusamy et al., 2022). Por otra parte, los RME son aquellos residuos generados en las actividades productivas y de servicios como el sector pesquero, ganadero, entre otros; y también cuando los RSU se generan en grandes volúmenes entran en esta categoría (LGPGIR). Finalmente, los RP son aquellos que debido sus características propias (químicas), no se pueden gestionar de manera convencional y atentan directamente contra la salud pública y ambiental (Ramírez Lara et al., 2017).

Como se mencionó anteriormente, el crecimiento poblacional ha provocado una mayor generación de residuos, sobre todo en los países más desarrollados. Los RSU son de gran preocupación debido a su alta tasa de generación y se estima que a nivel mundial habrá un aumento significativo en la generación de RSU y que alcanzará un valor de 3.4 billones de ton/año para el 2050, en donde el 70% serán destinados a los rellenos sanitarios (Kaza et al., 2018). Si la composición de los residuos de los rellenos sanitarios se mantiene como se encuentra actualmente en México, más del 40% de los residuos contenidos en estos serán residuos orgánicos (RO). Lo que indica una necesidad urgente en la implementación de proyectos de gestión integral de residuos para la disminución de estos mismos y obtener provecho a su vez, lo que llevaría a una economía circular.

En México, según el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos (DBGIR) realizado en el año 2020, se reportó que se generaron más de 87.8 millones de ton/año de RO entre los sectores pesqueros, agrícolas, avícolas y ganaderos. También, que el 46.42% de las 120,128.00 ton/día de los RSU fueron RO; mientras que de las plantas de tratamiento de aguas residuales se generaron 32.46 millones de ton/año de lodos residuales. Lo anterior muestra la importancia de dar un tratamiento integral a los RO, ya que la inadecuada gestión de estos, provocan problemas de emisiones de gases de efecto invernadero; contaminación del agua, suelo y aire; además de problemas de salud pública.

En las últimas décadas, el tratamiento de los RO ha cobrado cada vez más importancia, debido a la dimensión del problema que representan por el aumento de los volúmenes generados y por los efectos ambientales derivados de la inadecuada gestión. Por ello, es necesario que todos los RO reciban un adecuado tratamiento y valorización antes de su disposición final. El tratamiento de los RO mediante, tecnologías y procesos sustentables, es una alternativa para disminuir los impactos negativos derivados de su inadecuada gestión.

Lo anterior obliga al sector científico y gubernamental a fomentar el uso de tecnologías sustentables para el tratamiento de RO, de lo contrario, se atenta contra los acuerdos generados entre países respecto a la agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El tratamiento no sostenible de los RO afecta directamente con los siguientes ODS: número 3 (Salud y Bienestar), 15 (Vida de ecosistemas terrestres) y 13 (Acción por el clima) por los contaminantes generados al medio ambiente, mientras que de manera indirecta contra el ODS número 14 (Vida submarina) y el número 6 (Agua limpia y saneamiento); esto se da porque los lixiviados generados en los sitios de disposición final, se filtran por el subsuelo hasta llegar a mantos acuíferos, contaminando ríos y mares. Por otra parte, los residuos de naturaleza líquida, como lo son las aguas residuales, generadas en el sector doméstico, industrial, ganadero, pesquero, y demás; no permiten el cumplimiento de los ODS 14 y 6 mencionados anteriormente. Lo anterior muestra una problemática compleja derivada de la inadecuada gestión de los RO y aguas residuales.

Por lo anterior, es fundamental el tratamiento sustentable de los RO y aguas residuales, una alternativa para este fin, es la implementación de biodigestores anaeróbicos, ya que reduce la afectación de los ODS antes mencionados, además de beneficiar otros ODS, siendo; el número 6 (Agua limpia y saneamiento) al poder tratar el agua de tal manera que su disposición final no sea dañina, el número 7 (Energía asequible y no contaminante) al poder brindar energía eléctrica y/o calorífica, el 9 (Industria, innovación e infraestructura) al implementar tecnologías amigables con el ambiente, el 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el número 12 (Producción y consumo responsables) al crear una economía circular donde los RO sean devueltos a la tierra y cubran necesidades básicas.

Por otra parte, en el estado de Baja California la gestión integral de los residuos es parte del reordenamiento ambiental. Por lo que un enfoque importante para la presente tesis es la sección de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), que establece la necesidad de fortalecer la investigación y desarrollo científico, así como la innovación tecnológica, para reducir la generación de residuos y diseñar alternativas para su tratamiento, orientadas a procesos productivos más limpios, y establecer medidas de control.

El municipio de Mexicali, del estado de Baja California, aún presenta escasas acciones de vinculación con instituciones académicas locales y regionales, que pudieran desarrollar propuestas de investigación e innovación tecnológica que contribuyan con el manejo de los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales. La propuesta de mejoras tecnológicas ha estado sujeta a los términos de colaboración con empresas concesionarias, que se encarga de la infraestructura para la transferencia y disposición final de residuos (Crescencio, 2014).

A pesar de que existen diversos tipos de tratamientos de los residuos, la digestión anaeróbica juega un rol importante en el tratamiento de los residuos orgánicos debido a:

- Su capacidad de transformar el 90% de la materia orgánica en biogás (50-70% de metano, CH₄).
- Reducir la cantidad de sólidos para disposición final.

- Tiene bajo costo de operación respecto a un sistema de digestión aeróbico, debido a que no requiere dispositivos de aireación que conllevan a un alto consumo energético.
- La demanda energética es menor en comparación con otras tecnologías para tratamiento de la biomasa.
- Como subproducto del proceso de digestión anaeróbica, se produce bioabono orgánico que sirve para nutrir la tierra de jardines o plantas en general.

La Digestión Anaeróbica (DA) es una alternativa sustentable, la cual juega un rol de suma importancia para combatir el cambio climático y ser relevante para la generación de energía a nivel mundial (Ghimire et al., 2017; Long et al., 2013), ya que a partir de los RO y aguas residuales; esta es capaz de generar biogás, un biocombustible que puede ser aprovechado energéticamente. La tecnología en la que se realiza el proceso de digestión anaeróbica se conoce como biodigestor anaeróbico.

El funcionamiento general de un biodigestor anaeróbico, inicia colocando la materia orgánica en un contenedor totalmente hermético en el cual ocurre un proceso de descomposición de materia, debido a la acción de bacterias anaeróbicas que se crean durante este proceso. En un proceso de DA ocurren cuatro etapas, las cuales consisten en: hidrólisis, la cual es la primera en ocurrir en este proceso y es de suma importancia en la degradación de la biomasa compleja en compuestos simples, lo que permite el aprovechamiento de esta por microorganismos (Rodríguez-Mata et al., 2023). Es decir, la biomasa o materia orgánica compleja, está conformada por carbohidratos, proteínas y lípidos (polímeros complejos) los cuales son transformados en azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos, los cuales son fermentados en la acidogénesis (segunda etapa de la DA) generando ácido láctico, ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico (ácidos orgánicos), los cuales en la acetogénesis (tercera etapa de la DA) se transforman en acetato, Hidrógeno (H_2) y Dióxido de Carbono (CO_2), lo cual es consumido en la etapa metanogénica, donde se forma el metano, CO_2 y otros gases. Es a esta conformación de gases a la que se le da el nombre de biogás (Nakasima, et al., 2017).

Por lo anterior, el proceso de DA resulta prometedor para la gestión de los RSO como los generados en establos, granjas, sector domiciliario, entre otros. Por lo que se considera una alternativa sustentable para la adecuada gestión de RSO y aguas residuales. El proceso de DA depende de las características fisicoquímicas del residuo a tratar, por lo que no todos los residuos tienen alto potencial de generación biogás. Para solucionar este problema, es común tratar un conjunto de residuos orgánicos de diferente origen y composición; lo cual permite mejorar el rendimiento de biogás generado. A este proceso de tratamiento se le conoce como Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA).

Sin embargo, cuando dos o más fuentes residuales son tratadas mediante el proceso antes mencionado, esta toma el nombre de co-digestión anaeróbica y se utiliza para mejorar el rendimiento de producción de biogás de un residuo con bajo potencial de biogás.

Actualmente una problemática ambiental detectada en el Campus Mexicali I de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), se basa principalmente en la gestión de los residuos generados por la poda de jardín, residuos de alimentos provenientes del centro comunitario, y las aguas residuales que llegan a la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de la UABC. Como punto de referencia, en el 2008 se cuantificaron solo en el Campus I, una tonelada diaria de residuos sólidos, generando el centro comunitario de esta institución 128.76 kg de RSO (Armijo, 2008). Por lo anterior, en este proyecto de tesis se realiza una estimación teórica del potencial de biogás por co-digestión anaeróbica de los RSO y aguas residuales de la UABC, campus Mexicali I, con la finalidad de tratarlos de manera sustentable por medio del proceso de

co-digestión anaeróbica. Además, se propone una metodología de muestreo que permita caracterizar fisicoquímicamente a los residuos de alimentos y aguas residuales y determinar el sustrato adecuado que permita el mejor rendimiento de biogás. Es importante mencionar que, debido al alto contenido de humedad y materia orgánica que tienen este tipo de residuos, el proceso de co-digestión anaeróbica es de las mejores alternativas para su adecuado tratamiento (Slorach et al., 2019), obteniendo como principales productos biogás (con alto contenido de metano) que puede ser aprovechado como fuente de energía térmica y/o eléctrica, y bioabonos sólidos y líquidos aprovechables para las áreas verdes del campus universitario.

Como se mencionó anteriormente, la metodología de caracterización propuesta en esta tesis, puede ser replicable a sitios con alta generación de RO con alto contenido de humedad; por lo que este proyecto permite dar las bases de estudio para gestionar los residuos orgánicos mencionados. Finalmente, la UABC, al ser una institución orientada a la formación de profesionistas, puede realizar proyectos que promuevan la sostenibilidad para realizar acciones que reduzcan los impactos nocivos al ecosistema derivado de sus actividades diarias.

1.2 Antecedentes

En la actualidad la generación de los RO es una preocupación mundial, ya que la población ha crecido de manera exponencial y se estima que se mantendrá esta tendencia, provocando el incremento de la demanda de recursos naturales y generación de RO derivados de todas las actividades humanas (Dharmendra, 2022). Por otra parte, como ya se mencionó en la sección anterior, el tratamiento sustentable de los RO con alto contenido de humedad (como los Residuos de Alimentos (RA)) y Aguas Residuales (AR), son de los grandes retos en el ámbito científico, tecnológico y gubernamental; ya que la inadecuada gestión y disposición final de estos, está provocando contaminación del suelo, aire y agua; así como problemas de salud pública y económicos.

Generalmente el tratamiento de las AR y los RA se suele tratar de manera independiente; sin embargo, dependiendo de las características fisicoquímicas en las que se encuentren los RA, como el porcentaje de humedad, la cantidad de Carbono, de Nitrógeno, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), entre otras; permite que ambos residuos se puedan tratar con el mismo método (Chan et al., 2018a). Por lo que, la implementación de un método que permita el tratamiento de ambos residuos de manera simultánea, es fundamental para llevar a cabo un tratamiento sostenible.

Los principales métodos de tratamiento de las AR son la digestión aeróbica y anaeróbica. En los procesos de digestión aeróbica se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica en presencia de oxígeno mediante actividad microbiana; estos procesos suelen ser costosos por la aireación del sistema y la alta tasa de generación de lodos activados, ya que estos requieren de un tratamiento adicional. Además, entre mayor es la carga orgánica del agua residual, mayor es el requerimiento de aireación y por consecuencia el costo energético del proceso aumenta (Kim et al., 2014; Pons et al., 2004; Silva-Teira et al., 2018). El hecho de tratar aguas residuales y generar lodos, es controversial si hablamos de gestión integral de residuos, ya que se debe optar por un proceso aparte para mitigar las problemáticas de los lodos lo que implica otro costo.

Por otro lado, los procesos de digestión anaeróbica (DA) también consisten en la degradación de la materia orgánica por actividad microbiana; sin embargo, este proceso ocurre en ausencia de oxígeno; dando como resultado un biocombustible gaseoso (biogás) y dos subproductos (bioabono líquido y sólido) que permite regresar nutrientes al subsuelo (Nakasima, et al., 2017). En un proceso de DA entre mayor es la carga orgánica, la pertinencia de utilizar estos procesos aumenta, en contraparte con la digestión aeróbica; sin embargo, la inversión inicial del proceso de DA respecto al de digestión aeróbica es mayor, aunque el costo operativo suele ser menor (Tchobanoglous et al., n.d.).

Por otra parte, los RA se suelen tratar principalmente mediante procesos de compost y por DA. En un proceso de compost, los RA se degradan biológicamente de manera controlada en presencia de oxígeno, lo que permite la estabilización de sustratos dando lugar a un bioabono sólido que permite regresar nutrientes al subsuelo y plantas. En este proceso se tiene generación de calor, pero no se genera algún biocombustible, también en el proceso de compost no se pueden tratar determinados tipos de RA, como la carne, leche, entre otros. Por otro lado, cuando los RA presentan alto contenido de humedad se dice que son aptos para ser tratados por el proceso de DA, por lo que una gran variedad de RA se podría tratar con este método. Una de las principales razones por las que los RA son tratados por medio de la DA, es que los RA representan una alta carga orgánica para la DA y por lo mencionado anteriormente, esto beneficia al proceso de digestión anaeróbica. Por lo anterior, se vislumbra que uno de los métodos para dar tratamiento sustentable a los RA y AR es por medio del proceso de DA. Sin embargo, el rendimiento del proceso de DA depende directamente de las características fisicoquímicas que tengan estos residuos, de su tasa de generación y del tipo de tecnología en el que se lleve a cabo la DA, principalmente (Chowdhury & Nakhla, 2016).

Las características fisicoquímicas son fundamentales para que el rendimiento del proceso de DA sea óptimo. Cuando se tienen RO, cuya composición fisicoquímica no es la más adecuada para el proceso de DA, se suele utilizar un sustrato compuesto por dos o más residuos. Al proceso anterior se le conoce como Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA). La Co-DA tiene el beneficio de tratar varios residuos de manera simultánea, maximizar el potencial de biogás y disminuir el costo de la tecnología a utilizar en el proceso de digestión (Nihalani, 2017). Por ejemplo, si se trata por DA un RO con un pH ácido (condición que puede inhibir el proceso), se puede mezclar con otro RO que tenga un pH alto, con la finalidad de que el sustrato producto tenga un pH neutro, logrando que los microorganismos que se encargan de llevar a cabo la generación de metano, cuenten con un pH óptimo para llevar a cabo su actividad microbiana. Sin embargo, se debe tener cuidado de que dicha Co-DA no afecte negativamente a otros parámetros; es decir, se vuelve fundamental encontrar la proporción correcta entre ambos RO.

Los RA presentan variabilidad en cuanto a su composición fisicoquímica y tasa de generación, debido a que los RA generados dependen de la dieta de las personas, época del año, del sitio de recolección y generación, entre otro (Angula et al., 2022). Algo similar ocurre con las aguas residuales, ya que éstas dependen de la dinámica de vida de las personas y cambia incluso de manera horaria a lo largo del día (Fisgativa et al, 2016). Sin embargo, diversos estudios muestran que, pese a lo anterior, el tratamiento por Co-DA de estos residuos puede ser viable.

Generalmente, la implementación de la DA y/o Co-DA de las AR Domésticas (ARD) se basa en el tratamiento de los lodos Residuales de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (proceso aeróbico), principalmente porque dichos lodos se generan en gran cantidad y su disposición final es un problema por contar con alta carga orgánica y patógenos. Por lo que, para este caso, la DA se enfoca en dar tratamiento a los lodos residuales de las PTAR e indirectamente a las aguas residuales. El tratamiento de los lodos de las PTAR por medio de la DA y Co-DA es una de las mejores alternativas, debido a que es un tratamiento con bajo costo operativo y bajo impacto ambiental (Haslinger et al., 2016; Kimura et al., 2017; Serralta et al., 2002).

Otra razón por la que se opta por tratar los lodos de las PTAR en lugar de las ARD, es porque la DA de las aguas residuales presenta bajos rendimientos de biogás, debido a que los microorganismos no se encuentran estabilizados, ya que cuentan con sustancias como jabón y/o detergentes, entre otros; y presentan mayor variabilidad en las características fisicoquímicas en comparación con los lodos efluentes de las PTAR (Pretel et al., 2016). Pese a todo lo anterior, otros autores sugieren el tratamiento de las ARD en Co-DA con RA debido a que: 1) los RA le aportan alta carga orgánica mejorando la DQO; 2) la relación C:N se beneficia impactando en una reducción del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), lo que implica una tecnología de Co-DA más compacta; 3) se puede llegar a neutralizar el pH ácido que suelen presentar los RA ayudando

al proceso metanogénico de las bacterias y consiguiendo así una mayor producción de biogás; 4) se pueden tratar dos residuos de manera simultánea con un mismo proceso, lo que aumenta significativamente la viabilidad del proceso (Moñino et al., 2017). Con lo anterior, se amortigua la variabilidad de las características fisicoquímicas, además de que la producción de lodos del proceso anaeróbico es significativamente menor al de los procesos aeróbicos como en las PTAR; por lo que la disposición de estos ya no es un problema, sino que son un subproducto con valor agregado.

Como se mencionó anteriormente, la variabilidad de los RA es uno de los grandes retos que se presentan al momento de querer desarrollar un proyecto de DA y Co-DA de estos residuos; ya que esta impacta de manera directa en el diseño de las tecnologías (biodigestores) que llevan a cabo estos procesos. Sin embargo, se ha detectado que cuando se utilizan los RA de restaurantes, cafeterías y plantas procesadoras de alimentos, mercados, entre otros; la variabilidad puede ser menor que la de los RA generados en el sector doméstico, dado que en estos puntos se tienen mayor control en cuanto al tipo de residuos que se generan (Durán et al., 2018). Un ejemplo de estos casos son los restaurantes, cafeterías o centros comunitarios de escuelas y/o universidades; ya que por lo general se mantienen los mismos menús, los alimentos se cocinan de la misma manera y se suelen preparar cantidades similares de comida; lo que hace que la variabilidad de la generación y composición de RA sea menor que en conjuntos habitacionales; además se tiene la ventaja de que en estos sitios es más sencillo y económico la recolección y separación de los RA. Por tanto, las cafeterías de Universidades y/o escuelas y restaurantes se consideran sitios factibles para la implementación de biodigestores para la generación de biogás a partir de sus residuos orgánicos.

Recientemente, en el 2019, La Universidad de Putra Malaysia (UPN), puso en marcha un biodigestor anaeróbico con una capacidad de 15 m³ (el cual fue alimentado con un sustrato diariamente de 15 kg de RA preparado con una relación 1:1 del RA:agua) y una bolsa de almacenamiento de biogás de 10 m³. Se realizó un muestreo para cuantificar la generación de RSO durante un periodo escolar (de octubre a febrero) y un periodo vacacional, con la intención de evaluar la generación y composición de RSU. Esta institución generó entre 5-7 ton/día de RSU donde el 30-35%, correspondía a RA, desechos de cocina, incluidas verduras y carne, procedente de los restaurantes universitarios, lo que equivaldría aproximadamente a 2.2 ton/día. Los autores estimaron que con los RA generados era posible tener una generación de energía eléctrica diaria de 715 kWh (Ahmad et al., 2019).

En el 2021, la Universidad Federal de Santa María (UFSM) en Brasil, implementó una planta piloto de DA como alternativa de tratamiento de los residuos orgánicos de su cafetería (F. Granzotto, et al, 2021). La planta (biodigestor semi-continuo) operó 240 días a condiciones de temperatura mesolíticas y tenía una capacidad de 200 L; el TRH fue de un intervalo de 30 a 60 días. En la cafetería de la UFSM se generaron de 104.5 a 430 kg/día de residuos de alimentos, en donde los principales tipos de residuos de alimentos fueron: cáscaras de frutas y verduras; semillas de papaya, melón y calabaza; trozos de manzana y diferentes residuos como ejotes crudos y cocidos, pasta cocida, pimientos, entre otros. Las principales características fisicoquímicas tuvieron un valor medio de 112 mg/L, 228,462 mg/L, 83,587 mg/L, 25,327 mg/L, 21,894 mg/L y 813 mg/L para Nitrógeno total, DQO, DBO₅, TS, VS y SS respectivamente; mientras que el pH presentó valores mínimos y máximos de 4.8 y 6.3 respectivamente. Se reportó que para un porcentaje de ST del 20% y %SV de 90% respecto a TS, la producción de metano fue 0.04 m³/kg-sustrato y un rendimiento específico de metano de 0.22 m³/kgSV. La calidad del biogás estuvo entre el 56-86%. Con la generación anual de residuos de alimentos de 12,750 kg, los autores reportan que en la universidad se podrían producir anualmente 854.3 m³ de biogás, equivalentes a 1,780 kWh de generación de energía eléctrica (F. Granzotto, et al, 2021).

En la Universidad Federal do Rio Grande en Brasil, se recolectaron diariamente durante dos semanas los RA generados de su cafetería para utilizarlo como sustrato para un proceso de DA. Los RA fueron clasificados en tres fracciones diferentes: proteína, carbohidratos y, frutas y

verduras las cuales se combinaron para la elaboración de composiciones diferentes. Estimaron una generación de 216 kg/ día de RA. Las muestras obtenidas fueron trituradas para ser caracterizadas fisicoquímicamente en laboratorio. Los autores reportaron que, en la composición de frutas y verduras, existió una mayor degradación de la biomasa, siendo poco más del 69% en 10 días, y una mayor producción de metano aproximadamente de 0.20 L CH₄ /g SV, comparándolo con los análisis obtenidos de las mezclas que no contaba con frutas y verduras. Por lo tanto, aunque el potencial teórico de producción de metano a partir de la mezcla de frutas y verduras resultó de 0.037 L CH₄/g, y en su estudio arrojó ser menor, se recomendó que los RA sean tratados por DA en conjunto con las demás fracciones (proteínas y carbohidratos), demostrando que es adecuado la gestión de RA por medio de la DA en la misma proporción en que se desechan, sin la necesidad de separarlo, y se recomendó la Co-DA con otras biomásas para mejorar este potencial de biometano (Assumpção et al., 2021).

Con la finalidad de mostrar la pertinencia de la Co-DA de los RA con ARD, Giwa et al. (2021) evaluaron dicha Co-DA en condiciones mesofílicas (35 °C), termofílicas (55 °C) y con un biodigestor en dos etapas, en donde en la etapa 1 se realiza la hidrólisis, acetogénesis y acidogénesis y en la etapa 2 la metanogénesis; también en condiciones mesofílicas. Los RA se recolectaron de un conjunto habitacional en la ciudad de Beijing, China; y estaban compuestos principalmente de vegetales y frutas, arroz, frijoles, pescado, huesos y pescado. Las aguas negras fueron extraídas de la fosa séptica del conjunto habitacional. El estudio se realizó a escala laboratorio con un volumen de trabajo de 0.8 L para las pruebas de una sola etapa y de 0.6 L y 0.8L para las etapas dobles. El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) fue de 30 días. Los RA tuvieron una DQO de 145,050 mg/L, un pH de 5.7 y 102,690 mg/L de SV; mientras que las ARD tuvieron un DQO de 6,807 mg/L, un pH de 7.4 prácticamente neutro y 225 mg/L de SV. Los resultados mostraron que con la Co-DA de estos residuos se tuvo una reducción del DQO del 97%.

También se tiene el estudio realizado por Ounsaneha et al., 2021, quien evaluó el rendimiento de generación de biogás a partir de RA proveniente de la cafetería principal del campus Hatyai de la Universidad Príncipe de Songkla, Tailandia y las aguas residuales municipales del sistema de tratamiento, empleando un biodigestor a escala laboratorio de tipo agitado continuo (CSTR) con una capacidad de 15 L en condiciones de temperatura ambiente en un rango de 27-32 °C. Dentro de su estudio se produjo con una relación de 10:90 aguas residuales y RA, operando de manera continua con un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) presenta un potencial significativo para la producción de biogás a nivel comercial, siendo este de 2,540 ± 67.1 ml con un contenido de metano de poco más del 65%.

La Universidad de Macao, China, recogió 2kg semanalmente de RA de sus comedores universitarios compuestos de verduras (30,2%), arroz (58,4%) y carne (11,4%), obteniendo los siguientes parámetros fisicoquímicos; DQO, Nitrógeno Total, pH, ST% y SV% siendo estos valores de 218,100 mg/L; 3,500 mg/L; 5.2; 21.8 mg/L y 20.2 mg/L respectivamente, mientras que las aguas residuales eran procedentes del influente de una PTAR local, las cuales contaron con los valores de; 505 mg/L, 35.4 mg/L, 7 pH, respectivamente. Todo esto con el objetivo de generar biogás, por medio de un reactor UASB que operó en modo continuo e intermitente con un volumen de trabajo de 38 L a condiciones mesofílicas (35-36 °C). Obteniendo que en co-digestión, la mayoría de la materia orgánica se eliminó, contando con una eficiencia de eliminación de casi el 96%, el cual fue convertido a biogás, que contó con un 54% de metano, que, a su vez, contó con un rendimiento de 0.212 LCH₄ /g DQO), valor aceptable considerando que el valor teórico máximo es de 0.35 L CH₄ /g DQO (Chan et al., 2018).

De igual manera en la Universidad de Alberta en Edmonton EU, recolectó el RA generado en sus comedores y salones, el cual estaba principalmente compuesto por granos (arroz, fideos, pan), residuos de vegetales (brócoli, zanahoria, cebolla), residuos de frutas (cáscaras de plátano y naranja, manzana) y residuos de bebidas (té, café) y a su vez tomaron aguas negras de inodoros, utilizando aspiradoras. Una vez obtenidas dichas muestras, se prepararon porciones con las

siguientes relaciones; 1:0.3, 1:0.6, 1:1 y 1:1.5, obteniendo un pH de 8.5, 5.4, 8, 7.8, DQO de 5.1g/L, 7.5g/L , 9.5g/L y 11.6 g/L, nitrógeno total de 2.5 g/L, 3 g/L , 2.7 g/L y 2.8 g/L y SV de 11.7g/L , 14 g/L , 17.5g/L y 21.5 g/L, respectivamente. Utilizando un biodigestor de tipo flujo continuo (UASB) con un volumen de 3.5 L a condiciones mesofílicas (35 °C). Tras este estudio se llegó a la conclusión de que hubo una mejora significativa en la producción de biometano mediante aumentos del RA a las aguas negras y más en la relación 1:1 con una de producción de metano de 2.42 ± 0.15 L/día.

Como se observa en los estudios anteriores y por lo ya mencionado con anterioridad, las características fisicoquímicas de los RA y ARD presentan una variabilidad, esto implica que en cada estudio se tenga que hacer una caracterización fisicoquímica de los RA. También dicha variabilidad conlleva que se tenga que realizar una cantidad mayor de muestras para conseguir una muestra representativa de los residuos generados. La metodología de muestreo para determinar la muestra representativa de los RA, así como la caracterización misma de los RA, es uno de los retos que hacen que los estudios de estimación de potencial de biogás sean complejos; ya que implica tiempo, recurso económico y equipo especializado.

Hay diversos estudios que se enfocan en la caracterización de los residuos como se puede ver en la Tabla 1. Se puede observar que en varios estudios no se presenta de manera clara el número de muestras o la frecuencia del muestreo; mientras que en los casos que sí se muestran, no se suele detallar los criterios establecidos que justifiquen las características del muestreo. Lo anterior hace notar que existe un cierto empirismo para establecer estos criterios. La falta de metodologías claras y estandarizadas, ha provocado que la caracterización sólo se realice a uno o dos RA específicos, con la finalidad de simplificar el proceso de obtención de muestras, de la frecuencia de muestreo y de la obtención de parámetros fisicoquímicos. Sin embargo, si el tamaño de muestra no es representativo, los resultados de la caracterización presentarán incertidumbre, aunque los análisis fisicoquímicos se hagan con base a las normas. Conduciendo a errores en la estimación de biogás y el diseño de biodigestores.

Tabla 1.- Estudio sobre co-digestión de diferentes RO y su potencial de metano.

Autor	Residuos	Método	Fuente	Tamaño de muestra	Muestreo	Biogás	Energía	Lugar	Dispositivo	T (°C)	Modelo
(Tong et al., 2019)	LR y RA	Prensa de tornillo	No	-	-	-	-	Comedor	-	-	-
(Satayavibul & Ratanatamskul, 2021)	AR y RA	APHA	Si	-	-	65.2%CH ₄	-	Cafetería	-	-	Directamente utilizando un cuadalimetro
(Saha et al., 2023)	LX y RA	-	Si	20kg	1 vez cada 3 meses	86% y ~ 3 L/d	850 kWh por tonelada de FW tratada	Cafetería U	De lecho de lixiviación cilíndrico convencional (LBR-C)	21-22	-
(Wang et al., 2017)	EL, EC, EP, PM, PS, RA, YC, EHC y HM	-	Si	2 y 1.5L	30 días	20%-30%	-	Granjas Comedor Municipio	Matraces Erlenmeyer de ocho pulgadas	35	-
(Leitão et al., 2022)	LR y RA	-	Si	500ml	-	91%	-	PTAR y Restaurante	Discontinuos Bioprocess AMPTS II	37	Modelo Gompertz
(Mu et al., 2020)	LR, RA y RJ	Zhang et al. (2015b)	Si	300ml	-	314,9 ± 17,1 mL/g de VS	-	Comedor U y PTAR	Botella Schott	35	-
(Marín et al., 2022)	AR, A y RA	-	Si	-	-	790 ± 89 mL g VSin -1 (68 ± 8 L d-1) (35 °C, 1 bar)	-	Restaurante	Biodigestor anaerobico (No especifica)	37	-

(Rajagopal & Béline, 2011)	EG	-	Si	150ml	-	-	-	PTAR	Discontinuo	-	-
(la Cour Jansen et al., 2004)	FORSU	Jensen	No	2-3kg	-	-	-	Relleno Sanitario	-	-	-
(Buendía et al., 2008)	LS, EV, RR, LC y LV	-	No	50kg	-	No especifica por ser baja	-	Industria de Carne	-		(modelo MP), descrito por Rodríguez et al. (2007), y ecuación de Orskov (Umetsu et al., 2006)
(Thakur et al., 2022)	RA y LA	-	Si	-	-	127,05 mLCH4 g-1 VSadded	-	Residencia	Agitado continuo a escala de laboratorio	37± 2	-
(Zhu et al., 2010)	FORSU	APHA	No	-	-	3.5L1 d1	-	Relleno Sanitario	APS	45-68	-
(Ejimofo et al., 2020)	ARP, HC y PCS	APHA	No	-	-	-	-	-	-	-	Cromatografía de gases (GC)
(Ware & Power, 2016)	RC	-	Si	-	-	9.5 y 650.9 mLCH4 gVS1	-	Instalación de sacrificios y cervecería	-	-	-
(Chiu et al., 2013)	RA y LARP	-	No	800ml	-	-	-	Restaurante y Residencial	Respirómetro de burbujas	55	-
(Wickham et al., 2016)	RSU	-	No	750ml	-	3 a 6 veces mejor	-	PTAR, comercios y panaderías	Botellas de fermentación	-	-

Nota: RA-Residuos de Alimentos, LR- Lodos Residuales, AR- Aguas Residuales, LX – Lixiviados, ARP- Aguas Residuales de Pintura, HC-Harina de Concha de Caracol , PCS-Lodos de poscoagulación, RSU- Residuos Sólidos Urbanos, EL- Estiércol Lácteo, EC- Estiércol de Cerdo, EP-Estiércol de Pollo, PM- Paja de Maíz, PS-Paja de Soja, YC-Yuca, EHC-Extracción de Hierbas Chinas, HM-Harina de Maíz , RJ- Residuos de Jardín , A-Algas, FORSU-Fracción Orgánica Residuos Sólidos Urbanos, EG- Estiércol de Ganado , LARP-Lodo Agua Residuales Porcinas, RC-Residuos de Cervecería , EV-Estiércol de Vaca , RR-Residuos Rúmiales y LS-Lodos Secundarios.

Por lo anterior, en esta tesis se realiza un estudio teórico para estimar el potencial de biogás de los residuos de alimentos del centro comunitario y ADR de la UABC Campus I de Mexicali. En primera instancia, se propone un método de muestreo sistemático que permita realizar una caracterización fisicoquímica representativa para los RA y ADR durante los periodos escolares 2023-1 y 2023-2, con la finalidad de establecer los criterios metodológicos de muestreo replicable en universidades, escuelas, restaurantes, entre otros. La caracterización mencionada, permite conocer el recurso biomásico disponible; así como estimar el potencial de biogás reduciendo el nivel de incertidumbre y evaluar la pertinencia que hay en el aprovechamiento de los RA y ADR para la producción de biogás. Por otra parte, los datos de la caracterización fisicoquímica, permite que se tenga información confiable para que, en investigaciones futuras, se pueda diseñar el biodigestor con características óptimas para la cantidad y composición de la codigestión de los RA y ADR.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Estimar de manera teórica el potencial de biogás por co-digestión anaeróbica de los RSO y aguas residuales de la UABC, Campus Mexicali.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar una metodología para cuantificar y caracterizar los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales de la UABC campus Mexicali.
- Cuantificar y caracterizar los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales de la UABC campus Mexicali.
- Estimar teóricamente el potencial de producción de biogás y su aprovechamiento.

1.4 Metodología

El estudio propuesto sobre la estimación teórica del potencial de biogás por co-digestión anaeróbica de los RSO y aguas residuales de la UABC, campus Mexicali I; se lleva a cabo a partir de cuatro etapas, las cuales se detallan a continuación:

Etapas 1: Metodología para cuantificar y caracterizar los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales de la UABC campus Mexicali I.

- Recopilación, procesamiento y análisis de la información bibliográfica.
- Determinar el estado del arte de la técnica de muestreo y caracterización de RSO y aguas residuales.
- Establecer dinámica de generación con los locatarios del centro comunitario del Campus I y personal de la PTAR de la UABC.
- Establecer metodología de muestreo para los RSO del centro comunitario del Campus I y de las aguas residuales de la PTAR de la UABC

Etapas 2: Cuantificar y caracterizar los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales de la UABC

- Realizar la recolección una vez por semana durante todo el año escolar 2023 en la UABC.
- Cuantificar los residuos de alimentos muestreados.
- Caracterizar las muestras de residuo de alimentos y de aguas residuales.
- Generación de base datos fisicoquímicos de los residuos muestreados.

Etapas 3: Estimación teórica del potencial de producción de biogás y su aprovechamiento energético.

- Análisis e interpretación de resultados obtenidos de la caracterización de la biomasa estudiada.
- Estudio teórico del proceso de producción de biogás por co-digestión anaeróbica de los residuos de alimentos del Campus I y aguas residuales de la PTAR.

CAPITULO 2 Fundamentos teóricos

En el capítulo anterior se presentaron las bases que sustentan esta investigación, en donde se mencionaron varias problemáticas derivadas del inadecuado manejo de los RSO y aguas residuales, como contaminación del suelo, agua y aire. Además, se mencionó que una alternativa para poder brindar un tratamiento sustentable a los residuos mencionados, es mediante la implementación del proceso de digestión anaeróbica o co-digestión anaeróbica. Por lo que en este capítulo se presentan los fundamentos teóricos relevantes para llevar a cabo este estudio y la importancia de no verlos como un residuo sin valor, si no, como una opción viable para reincorporarlos a procesos sostenibles que conduzcan a un modelo de economía circular, transformando lo que comúnmente se conoce como “basura” en una fuente capaz de brindar beneficios a la comunidad.

2.1 Biomasa

La biomasa es una fuente de energía renovable como lo son: las energías solar, eólica, geotérmica, hidráulica, entre otras; sin embargo, esta fuente sustentable utiliza todo aquel material proveniente de plantas, desechos orgánicos humanos, animales, residuos de alimento, etc. Todo aquello que sea orgánico se le atribuye de igual manera el nombre de “biomasa”, siendo el mismo término para referirse a la fuente de energía renovable y al material orgánico antes mencionado.

La biomasa es considerada una fuente de energía renovable debido a que la generación de materia orgánica, a partir de procesos biológicos espontáneos o provocados, se lleva mediante un ciclo aprovechable a escala humana y esto se puede ver mediante el ciclo de la biomasa mostrado en la Figura 1 (Sims & Bassam, 2003).

2.1.1 Ciclo de la biomasa

El Sol es la raíz de todo lo que existe en nuestro entorno, incluyendo las energías renovables; su radiación es aprovechada por los sistemas fotovoltaicos y/o térmicos para la generación de energía solar, es el causante de los movimientos en la tierra que generan mareas y vientos, fenómenos que se aprovechan para la generación de energía hidráulica y eólica; además se tiene la generación de biomasa que existe de igual manera gracias a este astro.

La biomasa por concepto es “todo aquel residuo natural biológico”, pero ¿Dónde empieza a crearse? Retomando lo mencionado en el párrafo anterior, este ciclo inicia en el Sol, donde este constantemente esparce radiación al planeta tierra en forma de rayos de luz (energía). Dichos rayos son captados por la mayoría de las especies de plantas gracias a una biomolécula llamada clorofila, que permite la absorción de luz. Lo anterior provoca que las plantas sean capaces de aprovechar la energía como alimento junto con el agua, generando el proceso de fotosíntesis, obteniendo como producto el oxígeno (O₂) que respiran todas las especies animales (Khodabakhshi et al., 2015). Ahora, basándonos en la Primera ley de la termodinámica, la cual dice: “La energía no sea crea ni se destruye únicamente se transforma”, se tiene que la energía generada por las plantas es trasladada a otras especies animales, ya que estas fungen como alimento para ciertas especies animales, y a su vez estos mismos animales son alimentos para otros, generando lo que conocemos como cadenas tróficas, donde podemos ver como esta energía es traspasada de especie en especie hasta el momento de su fallecimiento, donde

su cuerpo es absorbido por microorganismos que generan nutrientes para el suelo generando nuevamente este ciclo.

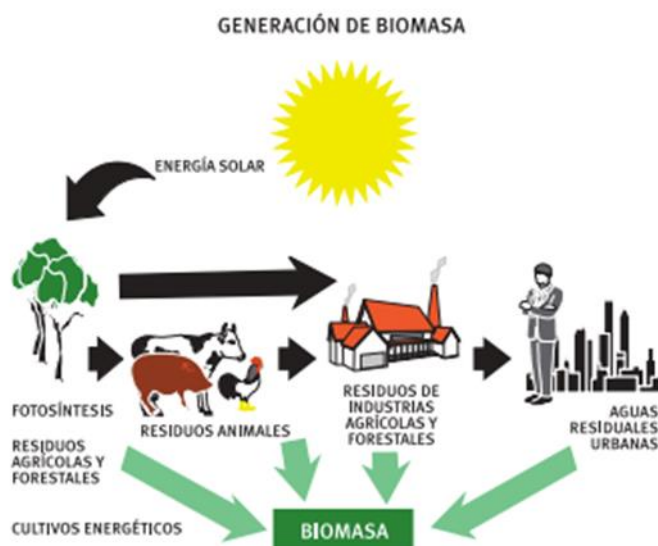


Figura 1: Ciclo de la biomasa.

Fuente: H2O Renovables

2.1.2 Tipos de biomasa

Dentro de los tipos de biomasa podemos encontrar clasificaciones diferentes partiendo desde su estado y/o manera de generación. Para toda la biomasa en general se utilizará el termino residuo orgánico (RO) y para los de estados solidos se utilizará Residuo Solido Orgánico (RSO). Dentro de la literatura, como se muestra (Romero Salvador, 2010), es habitual encontrar la biomasa catalogada como:

Biomasa Provocada: Se genera como resultado de actividades humanas planificadas y controladas. Actividades agrícolas, ganaderas e industriales son algunos ejemplos generales, pero también existen casos en que esta se genera para un fin en específico tales como los cultivos energéticos, que involucran la siembra de una planta en específico con el propósito de ser aprovechada como biomasa, por ejemplo, plantas como maíz, caña de azúcar, remolacha, entre otros, esto con la intención de potenciar su eficiencia como biomasa, esto implica una intervención por parte del ser humano, ya que incluye actividades como la preparación del suelo, la siembra de cultivos, el riego, el control de plagas y malezas, la cosecha de la biomasa en el momento óptimo y el transporte de los materiales.

Biomasa Espontánea: Se genera de forma natural sin la intervención directa del ser humano e incluye la vegetación y los residuos orgánicos que se generan naturalmente en el entorno. Bosques naturales, selvas, praderas, pastizales, así como la vegetación acuática y los residuos orgánicos presentes en cuerpos de agua. A diferencia de la biomasa provocada, la biomasa espontánea requiere menos intervención humana en su producción y gestión. Aunque los seres humanos pueden influir en los

ecosistemas naturales a través de actividades como la gestión forestal y la conservación, estos ecosistemas tienden a desarrollarse y mantenerse principalmente a través de procesos naturales.

Por otro lado, dependiendo de las características físicas de la biomasa esta puede ser clasificada como:

Biomasa Húmeda: Se refiere a materiales orgánicos con un alto contenido de humedad, como residuos de alimentos, estiércol, y otros desechos orgánicos que contienen una gran cantidad de agua y es por esto que hay una mayor disponibilidad. Su alto contenido de humedad, facilita su manipulación y transporte en comparación con la biomasa seca, además de tener un menor costo de tratamiento en costos de procesamiento y cuenta con un alto potencial de metanización mediante DA.

Biomasa Seca: Se refiere a materiales orgánicos con un contenido de humedad reducido, como madera, paja, residuos agrícolas secos, así como pellets y briquetas de biomasa. Cuenta con una mayor densidad energética en comparación con la biomasa húmeda, lo que puede reducir los costos de transporte y almacenamiento, su bajo contenido de humedad puede disminuir los riesgos de contaminación microbiológica y olores desagradables durante el almacenamiento y procesamiento. Algunos tipos de biomasa seca pueden requerir pretratamientos adicionales, como trituración, secado o pelletización, lo que puede aumentar los costos de procesamiento y contienen poco potencial para la generación de biometano.

Por otro lado, cuando hablamos de biomasa en estado líquido, se le da un nombre distintivo dependiendo del proceso de donde estos provengan, tales pueden; ser lixiviados (sustancia que se produce en la acumulación de materia orgánica) o aguas residuales. Estas pueden clasificarse de diversas maneras según su origen y el tratamiento que requieren según Henze, 2008 y Sarizadeh et al., 2022, siendo las siguientes en mostrarse:

1. **Aguas Residuales Domésticas:** Son aquellas que se generan de actividades cotidianas en hogares, como el uso del inodoro, lavado de ropa, duchas y lavado de platos. Contienen materia orgánica, nutrientes y pueden estar contaminadas con microorganismos patógenos.
2. **Aguas Residuales Industriales:** Provenientes de procesos industriales como la fabricación, producción o limpieza. Pueden contener productos químicos, metales pesados, aceites, productos farmacéuticos u otros compuestos dependiendo del tipo de industria.
3. **Aguas Residuales Agrícolas:** Proceden de actividades agrícolas, riego de cultivos, lavado de equipos y pueden contener fertilizantes, pesticidas, sedimentos y otros residuos relacionados con la agricultura.
4. **Aguas Pluviales o de Lluvia:** No son técnicamente aguas residuales, pero pueden mezclarse con estas en sistemas de alcantarillado. Son aguas de escorrentía que pueden arrastrar contaminantes superficiales como aceites, sedimentos, pesticidas y residuos urbanos.
5. **Aguas Residuales Hospitalarias o Sanitarias Especiales:** Procedentes de hospitales, clínicas y centros de atención de salud. Contienen agentes patógenos, productos farmacéuticos y productos químicos utilizados en procedimientos médicos.

Estas aguas residuales requieren diferentes niveles de tratamiento dependiendo de su composición y el riesgo que representen para la salud pública y el medio ambiente. El tratamiento puede incluir procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar contaminantes, reducir la carga orgánica, desinfectar el agua y hacerla segura para su reintroducción en el medio ambiente o su reutilización para diversos fines, como riego agrícola o incluso en procesos industriales.

2.1.3 Disponibilidad biomasa en México

Los intereses científicos por el estudio de los biocombustibles han tomado relevancia hoy en día, especialmente por su aplicación en el sector transporte; sin embargo, también pueden aplicarse en la generación de energía eléctrica y/o térmica. Algunos de los aprovechamientos de la biomasa más relevantes en la actualidad son; el biogás, el hidrógeno renovable, el biocarbón y los pellets. Estos se han estudiado considerando diferentes materias primas renovables, principalmente biomasa residual, debido a la emergente importancia de la economía circular. Los RO son analizados de diferentes vías de conversión para encontrar el proceso adecuado para su gestión y óptimo aprovechamiento (Hernández et al., 2022). En la actualidad México, es considerado un país con recurso renovable en abundancia, sin embargo, su enfoque en procesos y desarrollo tecnológicos renovables no es una prioridad.

Particularmente la Secretaría de Energía (SEDER), en el país, México, definió los residuos agrícolas como biomasa; agrícola residual, según el ciclo de producción de cultivos de temporada y perennes (cultivos con periodos largos de siembra), e incluyó los residuos forestales de los aserraderos, desechos ganaderos, generado por el ganado utilizado para la producción de leche y/o como alimento, el estiércol de cerdos, aves de corral, y el estiércol generado en la cría de peses y mariscos. Debido a la carencia o difícil acceso de información legalmente disponible en estos sectores, se detectaron 181 fuentes que tendrían una capacidad de generación de energía a partir de metano (CH_4) de hasta 5722,52 TJ/a. La Secretaria de Energía (SENER) indico que actualmente está biomasa se utiliza para generar energía, empleando digestores de tipo geomembrana o laguna cubierta.

Considerando la biomasa residual disponible en México, se estimó en cerca de 278 millones de toneladas de residuos sólidos, obteniendo un potencial energético aproximado a los 2980 PJ, donde el 58% del potencial proviene de bosques y el 27% de residuos agrícolas y ganaderos (Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO)., 2018).

2.1.4 Tipos de aprovechamientos energéticos de la biomasa

La biomasa también puede clasificarse en húmeda o seca, lo que nos da un indicio de cuál es la mejor manera de procesarla, ya sea por un método termoquímico (para biomasa seca) y métodos bioquímicos (para biomasa húmeda) según sea el caso (Dubrovskis et al., 2009) y según Marulanda et al., 2019 algunas maneras de aprovecharlas según son las siguientes:

1. **Combustión directa:** La biomasa sólida, como residuos agrícolas, forestales o pellets de madera, puede quemarse para generar calor. Se utiliza en estufas, calderas y sistemas de calefacción para calentar espacios o generar vapor que impulsará turbinas para generar electricidad.
2. **Biogás:** La fermentación anaeróbica de residuos orgánicos produce biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. Este biogás se puede utilizar como combustible para la generación de electricidad, calefacción o como combustible para vehículos.

3. **Biocombustibles líquidos:** Se producen a partir de la transformación de materia orgánica en líquidos como biodiesel y bioetanol. El biodiesel se elabora principalmente a partir de aceites vegetales y se usa en motores diésel, mientras que el bioetanol se produce mediante la fermentación de cultivos ricos en azúcares o almidón, como la caña de azúcar o el maíz, y se emplea como aditivo en la gasolina.
4. **Pirolisis y gasificación:** Estos procesos térmicos transforman la biomasa sólida en gas de síntesis o biochar (carbón vegetal). El gas resultante puede usarse para generar electricidad o ser convertido en combustibles líquidos, y el biochar puede emplearse como fertilizante o en aplicaciones de retención de carbono en el suelo.
5. **Coprodutos y subproductos:** Además de la generación de energía, la biomasa puede generar subproductos útiles. Por ejemplo, durante la producción de bioetanol se obtienen residuos como el bagazo de caña, que puede utilizarse como combustible o para la producción de papel y tableros.
6. **Cogeneración o combinación de calor y energía:** Se aprovecha tanto el calor como la electricidad producidos a partir de la biomasa en un proceso simultáneo. Esto aumenta la eficiencia energética al utilizar ambas formas de energía.

Estos métodos muestran cómo la biomasa puede ser aprovechada para satisfacer las necesidades energéticas de manera sostenible, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y contribuyendo a la mitigación del cambio climático al ser una fuente de energía renovable y neutra en carbono.

2.2 Metodologías de muestreo de RA y aguas residuales

Como se puede observar en la Tabla 1 (Estudio sobre co-digestión de diferentes RO y su potencial de metano) ubicada en los antecedentes, el método para el estudio de los RSO para su aprovechamiento energético, no está definido del todo. Podemos encontrar frecuencias y tamaños variados en trabajos similares, sin embargo, no se esclarece el por qué se utilizan tales periodos o pesos para determinar, si es representativo o no. En cambio, para las aguas residuales existen normas particulares de cada país para su análisis ya que es un residuo que comúnmente es analizado en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) , al ser el agua un residuo vital para nosotros como sociedad y al utilizarla esta se vuelve una problemática cada vez relevante, debido a la escasez de este preciado líquido de suma relevancia en nuestra vida cotidiana (Johnny Harold Rojas Padilla et al., 2014; Juan Pablo Rodríguez Miranda et al., 2015).

Es por eso que para este proyecto se diseñó una metodología para el muestreo de RSO desde el punto de generación (plasmada en el Capítulo 3) y uso de la NMX-AA-003-1980 para las muestras de aguas residuales.

Por otro lado, algunas de las metodologías existentes o encontradas en la literatura para la caracterización de los RO son las siguientes:

Método convencional: Es la separación de los componentes de una población de manera manual, esta no es recomendable de aplicar en escenarios como rellenos sanitarios, esto debido a que son cantidades considerablemente grandes. Lo que implica la necesidad de varios individuos para la separación, malos olores, posible error de identificación de algunos residuos (debido a su posible descomposición) o dificultad en separar ciertos componentes por la mezcla o adhesión entre ellos.

Método de cuarteo: Este método de muestreo surge de la necesidad de obtención de “muestra representativa” de una población. Consiste en la ardua revoltura de todos los componentes y separarlos en cuatro partes iguales hasta que tenga el tamaño deseado. Este método fue descartado en este proyecto debido a que la caracterización del RSO de la cafetería puede ser analizada en su totalidad.

Método conocimiento empírico: Este método es el que más se observa en la Tabla 1, y está basado más que nada en las creencias de los autores en base a sus experiencias, conocimientos y evidencia, sin ningún sustento formal. Este método es común observarlo, debido a que, la cuantificación del residuo es compleja, algunos autores optan por la toma de un residuo en particular, por ejemplo, en vez de la utilización de todos los RSO que se puedan generar en un punto específico, estos solo utilizan uno de todos los grupos.

2.3 Métodos de muestreo estadístico

Dentro del contexto científico, se ve la necesidad de estudiar grupos o conjuntos que, en términos de cantidad o dimensiones, rebasan la capacidad de los aplicadores de una zona o grupo de interés a lo que se le denomina como “Población”. Por lo que es necesario aplicar técnicas que permitan la delimitación de la población en sí, con la extracción de una parte de menor cantidad o tamaño a al que se le denomina muestra, pero esta es representativa de lo que se busca a analizar. En palabras un método de muestreo es aquel que nos permite una selección de una muestra representativa ya sea individual o de subgrupos dentro de una población de interés (Rodríguez Balza et al., 2019). Existen cuatro muestreos de este tipo según Casal & Mateu, 2003 tales como:

1. **Muestreo Aleatorio Simple:** Se seleccionan muestras al azar de una población o área en la que cada elemento tiene la misma probabilidad de ser elegido. Es útil cuando se busca representatividad y se conoce poco sobre la distribución del material.
2. **Muestreo Estratificado:** La población se divide en estratos y se toma una muestra de cada estrato en proporción a su tamaño o importancia relativa. Se emplea cuando hay diferencias significativas dentro de la población.
3. **Muestreo por Conglomerados:** Se dividen grandes áreas o poblaciones en conglomerados o grupos más pequeños y se toma una muestra de estos conglomerados en lugar de individuos específicos. Es útil cuando es difícil acceder a cada elemento de la población.
4. **Muestreo Sistemático:** Se elige una muestra a intervalos regulares de una población ordenada. Por ejemplo, tomar una muestra cada cierto número de unidades o períodos de tiempo, el cual es determinado por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{N}{n} \quad (\text{ec 1})$$

Donde:

- ☐ K = salto de muestra en muestra
- ☐ N = población (cantidad de días laborales)
- ☐ n = número de muestra
- ☐ A = arranque del muestreo

2.4 Análisis estadísticos de generación de alimentos y de parámetros fisicoquímicos

El análisis estadístico es una práctica esencial en diversos campos científicos. Estos mismos permiten identificar tendencias y patrones de parámetros fisicoquímicos (para este caso) al proporcionar información relevante sobre la composición y comportamientos, lo que permite visualizar de manera eficiente la información y para el desarrollo tecnologías y conocimiento.

- Cálculo de promedio o media aritmética ($\bar{X}$): Es una medida de tendencia que representa el valor medio de un conjunto de datos evitando máximos y mínimos. Dando como resultado el valor que se repite en todo el conjunto de datos a analizar. Este valor es obtenido al sumar todos los valores del conjunto de datos y dividido por la cantidad de datos en total. La fórmula es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{ec } 10)$$

- Obtención de mediana (M): Este corresponde al valor que se encuentra en el medio de todo el conjunto de datos y para obtenerla se deben acomodar los valores de menor a mayor (o viceversa). En dado caso de que existan dos valores en el centro del conjunto, la mediana será el promedio de ambos valores.
- Cálculo de Desviación estándar (σ): Es el valor que nos indica la variación que existe entre los datos respecto al promedio y es dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- Cálculo de coeficiente de variación (CV): Se utiliza para determinar una variabilidad relativa entre de un conjunto de datos con base a su promedio. La ecuación para calcularla es la siguiente:

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}} \right)$$

- Cálculo de Intervalo de confianza (IC): Es la variabilidad que hay entre la medida obtenida de un estudio y la medida real de la población y corresponde a un rango de valores, cuya distribución es normal y en el cual se encuentra y para este estudio se calculó de la siguiente manera (para muestras menores a 30):

$$\bar{x} \pm t_c \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$$

2.5 Digestión y co-digestión anaeróbica para producción de biogás

Para lograr la producción de biogás se necesita atravesar un proceso de digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico). Durante este proceso se coloca la biomasa (residuos sólidos urbanos del sector residencial en nuestro caso) en un contenedor cerrado (conocido como el biodigestor) y ya dentro, se deja fermentar durante varios días, dependiendo de la temperatura ambiental es que se producirá un gas (condiciones mesofílicas >47 C o termofílicas <48 C), que como se menciona anteriormente es una mezcla entre metano, dióxido de carbono y traza de otros gases. Los sólidos dentro del biodigestor son los que se pueden utilizar como fertilizante orgánico. Según estudios bioquímicos y microbiológicos realizados en la actualidad, el proceso para la descomposición anaeróbica de la materia orgánica se divide en cuatro fases o etapas conocidas como Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis, las cuales se muestran en la figura 2 y son explicadas a continuación :

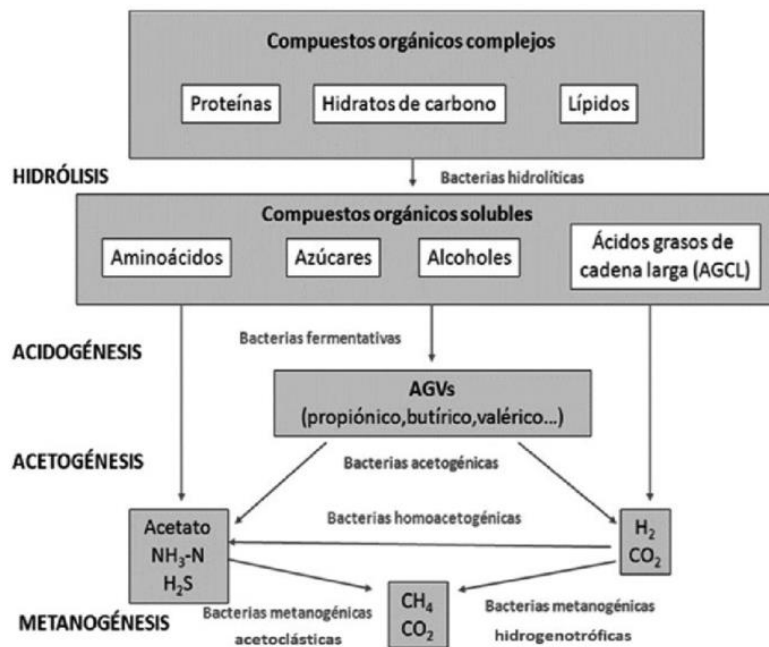


Figura 2: Proceso de la digestión anaeróbica (Fernández et al., 2016).

Hidrólisis

La primera fase del proceso de digestión anaeróbica se denomina hidrólisis, durante la cual las partículas y moléculas complejas, como proteínas, carbohidratos y lípidos, son descompuestas por enzimas extracelulares producidas por microorganismos acidogénicos o fermentativos. Este proceso reduce el tamaño de las macromoléculas, como proteínas, polisacáridos y grasas, transformándolas en moléculas solubles en agua y de fácil degradación, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos y alcoholes. Las moléculas poliméricas de materia orgánica no pueden ser utilizadas directamente por los microorganismos a menos que se hidrolisen previamente en compuestos solubles que puedan atravesar la pared celular. Por esta razón, la hidrólisis es considerada un paso esencial en la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos, proporcionando los sustratos necesarios para la digestión anaeróbica. Además, este proceso es el factor limitante de la velocidad global, especialmente en residuos con alto contenido de sólidos. Otros factores que limitan la etapa de hidrólisis y afectan la correcta degradación anaeróbica incluyen la temperatura del proceso, el tiempo de retención, la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), el tamaño de las partículas, el nivel de pH y la concentración de NH_4^+ (amonio). Dentro de la etapa de hidrólisis, las proteínas juegan un papel crucial en la digestión anaeróbica, ya que no solo son una fuente de carbono y energía, sino que los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un alto valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas por enzimas proteolíticas, conocidas como proteasas, en péptidos y aminoácidos, que son utilizados en la síntesis de nuevo material celular y degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro. Por otro lado, la degradación de lípidos en ambientes anaeróbicos, mediada por enzimas hidrolíticas llamadas lipasas, produce ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

Acidogénesis:

Durante la etapa de fermentación o acidogénesis, las moléculas orgánicas se descomponen en compuestos que pueden ser utilizados por las bacterias metanogénicas y otros compuestos orgánicos más reducidos. Posteriormente, estos compuestos atraviesan un proceso de oxidación bajo la acción de bacterias acetogénicas. La presencia de este grupo de bacterias es crucial, ya que no solo proporcionan alimento para las bacterias posteriores, sino que también eliminan cualquier rastro de oxígeno disuelto en el sistema. Estas bacterias, en su mayoría facultativas y anaeróbicas, están dominadas por especies capaces de formar ácidos.

Acetogénesis:

Se le llama al proceso de transformación de compuestos intermedios por bacterias acetogénicas. Debido a este proceso podemos conseguir ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono principalmente; pero el metabolismo tiende a depender de las concentraciones de estos productos, tal como más adelante es comprobado para el ácido butírico. Los homoacetogénicos son un tipo especial de microorganismos acetogénicos capaces de crecer heterotróficamente cuando se ven involucrados con azúcares o compuestos mono carbonados (mezcla entre H_2/CO_2) produciendo acetato como su único producto. En contraste a las bacterias acetogénicas, debido a su metabolismo estas tienen una nula producción de hidrógeno, debido a que lo consumen como sustrato. Según estudios, se ha demostrado que el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas como resultado a que mantiene bajas las presiones parciales del hidrógeno. Ejemplos de estas bacterias serían *Syntrophobacter wolinii* que descompone el ácido propiónico, o *Syntrophomonas wolfei*, que descompone el butírico. Tanto el ácido valérico como el butírico son descompuestos por la misma especie. Dentro de las bacterias acetogénicas podemos encontrar las homoacetogénicas, que como se mencionó anteriormente se encargan de producir ácido acético a partir de hidrogeno y dióxido de carbono, perteneciente a los géneros *Acetobacterium*,

Acetoanaerobium, Acetogenium, Clostridium o Eubacterium. Durante esta etapa del proceso, la mayor parte de las bacterias anaeróbicas ya extrajeron en su totalidad el alimento de la biomasa y han dado como resultado a su metabolismo, sus propios productos a partir de los desechos de sus células. Dichos productos, ácidos volátiles sencillos, son lo que serán utilizados como sustrato por las bacterias metanogénicas en la siguiente etapa (Nakasima, et al., 2017).

Metanogénesis:

Es la etapa final del proceso de transformación entre compuestos donde el ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono son transformados a CH_4 y CO_2 . Dentro de este proceso se pueden identificar dos tipos de microorganismos principales siendo estrictamente anaeróbicos, dividiéndose entre los que degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que consumen el hidrógeno (metanogénicas hidrogenófilas). Considerados como los más importantes de entre el consorcio de microorganismos anaerobios, los microorganismos metanogénicos son los responsables de formar metano y eliminar los elementos de grupos anteriores de en medio, dándole a este proceso el nombre de biometanización. Estos microorganismos son los encargados de completar el proceso de la digestión anaeróbica, por lo que a partir de sustratos mono carbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente, como lo son, acetato, H_2/CO_2 , fórmico, metanol y algunas metilaminas, crean metano. Los organismos metanogénicos pueden ser clasificados dentro del dominio Archaea, por lo que se sus características pueden diferenciarlos de entre el resto de los procariotas. Estos pueden dividirse entre dos grandes grupos de microorganismos los que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos y los que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Estudios han demostrado que del 70% de metano que es producido por reactores anaeróbicos se forma a base de la descarboxilación de ácido acético (Chan et al., 2019), aunque todos los organismos metanogénicos tengan la capacidad de aceptar electrones con el uso de H_2 , solo dos géneros pueden utilizar al acetato como aceptor de electrones; siendo entonces Methanosarcina y Methanotrix los únicos dos géneros con cualidades acetotróficas. El restante del metano proviene de sustratos tales como ácido carbónico, ácido fórmico y metanol, de los cuales el de mayor importancia sería el ácido carbónico, el cual es reducido por el hidrogeno, igualmente producido en la etapa anterior (Mu et al., 2020).

2.6 Definición de parámetros fisicoquímicos de los RSO y aguas residuales

La co-digestión anaeróbica es el mismo proceso que la digestión anaeróbica, con la diferencia de que en la co-digestión anaeróbica, se utilizan dos o más biomas que se mezclan para la elaboración de sustrato, esto con la intención de potenciar la producción de biogás al ser digeridos por microorganismos en ausencia de oxígeno (Chan et al., 2018b). A continuación, se muestran los conceptos clave y sus funciones:

1. **Sustratos:** Son los materiales orgánicos que se mezclan para la digestión anaeróbica. Pueden ser residuos agrícolas, desechos de alimentos, estiércol, lodos de depuradoras, entre otros. La diversidad de sustratos aumenta la eficiencia del proceso y la producción de biogás. Es fundamental en la digestión anaeróbica porque proporciona la materia prima necesaria para la producción de biogás. Su adecuada selección y preparación son esenciales para maximizar la eficiencia del proceso y optimizar la producción de biogás, lo que destaca su importancia en la gestión de sistemas de tratamiento de residuos orgánicos y en la producción sostenible de energía.

2. **Reactores anaeróbicos:** Este es un sistema cerrado diseñado para llevar a cabo la digestión anaeróbica de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este tipo de reactor proporciona un entorno controlado donde los microorganismos anaeróbicos pueden degradar la materia orgánica presente en un sustrato para producir biogás, así como otros subproductos. Estos pueden tener diferentes diseños y configuraciones, pero todos comparten el objetivo común de facilitar el proceso de digestión anaeróbica. Algunos de los tipos más comunes de reactores anaeróbicos incluyen los reactores de tanque agitado continuo (CSTR), los reactores de lecho fluidizado, los reactores de flujo ascendente de lodo (UASB), los digestores de alta carga y los reactores de membrana de ultrafiltración (MBR), entre otros. Estos reactores pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones, como el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, la gestión de residuos orgánicos y la producción de biogás para energía renovable. La selección del tipo de reactor adecuado depende de factores como el tipo y la composición del sustrato, la escala de la operación, los requisitos de tratamiento y los objetivos de producción de biogás.
3. **Microorganismos anaeróbicos:** Son las encargadas de degradar los sustratos en compuestos más simples y generan biogás como subproducto. Estos tienen la capacidad de vivir y crecer en ausencia de oxígeno molecular (O_2) y realizan procesos metabólicos que no requieren oxígeno para su funcionamiento y pueden sobrevivir en ambientes donde el oxígeno está ausente o presente en concentraciones muy bajas, a diferencia con los microorganismos aeróbicos, que requieren oxígeno para su metabolismo, los microorganismos anaeróbicos utilizan diferentes mecanismos para obtener energía, como la fermentación, la respiración anaeróbica. Desempeñan roles importantes en diversos procesos biológicos y ecológicos, como la descomposición de materia orgánica en suelos, el ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos y terrestres, la fermentación de alimentos y la producción de biogás en la digestión anaeróbica. Algunos ejemplos de microorganismos anaeróbicos incluyen bacterias anaeróbicas, arqueas metanogénicas, protozoos y hongos anaeróbicos. Estos organismos tienen adaptaciones específicas que les permiten prosperar en ambientes carentes de oxígeno y desempeñan un papel crucial en la biología y ecología de diversos sistemas naturales y procesos industriales.
4. **pH:** Es crucial para el funcionamiento óptimo de los microorganismos. Esta debe mantenerse entre 6.5 y 7.5. Los ajustes del pH se realizan agregando reguladores como carbonato de calcio o bicarbonato de sodio y este indica acidez o alcalinidad. Un pH adecuado favorece la actividad de los microorganismos metanogénicos, responsables de la producción de biogás, así como de otras bacterias que degradan la materia orgánica.
5. **Temperatura:** La actividad microbiana óptima ocurre dentro de un rango específico de temperatura, generalmente entre 35°C y 55°C. Esto se controla manteniendo el sistema a una temperatura constante.
6. **Tiempo de retención hidráulica (TRH):** Es el tiempo que la mezcla de sustratos permanece en el reactor. Se ajusta para maximizar la producción de biogás y la degradación de los sustratos.

7. **Relación C/N (Carbono/Nitrógeno):** Es la proporción entre carbono y nitrógeno en los sustratos. Una relación equilibrada promueve una descomposición eficiente y una producción óptima de biogás.
8. **Inhibidores:** Algunos compuestos pueden inhibir la actividad microbiana, como metales pesados, detergentes o ciertos productos químicos presentes en los sustratos. El control de estos es importante para mantener el proceso eficiente.
9. **Densidad:** Es la masa por unidad de volumen de una sustancia o mezcla. En el contexto de la digestión anaeróbica, puede referirse a la densidad de los sustratos orgánicos utilizados. La densidad puede influir en la relación agua/sólidos de los sustratos. Una densidad adecuada es esencial para mantener una adecuada relación agua-sólidos, lo que afecta la eficiencia del proceso anaeróbico.
10. **Humedad:** Es el contenido de agua presente en un material. En la digestión anaeróbica, se refiere al porcentaje de agua en los sustratos. La humedad es crítica para determinar la consistencia y la concentración de los sustratos. Un contenido de humedad apropiado es necesario para mantener condiciones óptimas de digestión y para asegurar la actividad microbiana adecuada.
11. **Sólidos Volátiles (SV):** Es la fracción de materia orgánica que se evapora o se descompone en condiciones específicas de temperatura y presión. Se expresa como porcentaje de los sólidos totales. Los sólidos volátiles son el componente principal para la producción de biogás en la digestión anaeróbica. Un alto contenido de sólidos volátiles en los sustratos puede significar un mayor potencial para la producción de biogás.
12. **Sólidos Fijos (SF):** Representa la fracción de materia inorgánica o no volátil en una muestra. Se expresa como porcentaje de los sólidos totales. Aunque los sólidos fijos no participan en la producción de biogás, su presencia puede influir en la densidad, la composición y la textura de los sustratos, lo que puede afectar la eficiencia de la digestión.
13. **Sólidos Totales (ST):** Definición: Es la suma de los sólidos volátiles y los sólidos fijos presentes en una muestra. El conocimiento de los sólidos totales permite comprender la composición total de los sustratos, lo que es esencial para ajustar la relación agua-sólidos y optimizar las condiciones de la digestión anaeróbica.
En otras palabras, los parámetros de sólidos totales, fijos y volátiles son relevantes en la digestión anaeróbica. Los sólidos totales representan la cantidad total de materia en la muestra, mientras que los sólidos fijos son la fracción inorgánica y los volátiles son la materia orgánica biodegradable. Estos últimos son de especial importancia, ya que indican la cantidad de materia que puede convertirse en biogás durante este proceso. Conocer la proporción de sólidos volátiles permite estimar el potencial de producción de biogás, mientras que comprender la fracción de sólidos fijos ayuda a comprender cómo pueden afectar la eficiencia del proceso.
14. **Cenizas:** Representa la fracción inorgánica no volátil de una muestra después de su combustión a altas temperaturas. Aunque no contribuyen a la producción de biogás, las cenizas

son importantes para determinar el contenido mineral de los sustratos. Altos niveles de cenizas pueden afectar la calidad del biogás y la eficiencia del proceso.

15. **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es una medida de la cantidad de materia orgánica oxidable en una muestra mediante reacciones químicas. La DQO es un indicador importante de la carga orgánica presente en los sustratos. Es útil para estimar la cantidad de materia orgánica que puede ser convertida en biogás y proporciona información sobre la capacidad de tratamiento de los sustratos en la digestión anaeróbica. Se utiliza como indicador de la carga orgánica presente en un cuerpo de agua o en un efluente y proporciona información sobre la concentración de contaminantes orgánicos que pueden ser biodegradados en un proceso aeróbico o anaeróbico. La DQO se expresa generalmente en miligramos de oxígeno por litro (mg/L) y se determina mediante análisis químicos específicos que oxidan la materia orgánica presente en la muestra. La importancia de la DQO en la digestión anaeróbica radica en su capacidad para proporcionar una estimación rápida y precisa de la carga orgánica presente en un sustrato. Al conocer la concentración de DQO en un sustrato, los operadores de plantas de tratamiento de aguas residuales y sistemas de digestión anaeróbica pueden ajustar las condiciones de operación y diseñar estrategias de tratamiento adecuadas para maximizar la eficiencia del proceso. En la digestión anaeróbica, la DQO del sustrato puede influir en la tasa de producción de biogás y la estabilidad del proceso. Un sustrato con una alta DQO proporcionará una mayor cantidad de materia orgánica susceptible de ser degradada por los microorganismos anaeróbicos, lo que puede resultar en una mayor producción de biogás. Sin embargo, niveles extremadamente altos de DQO pueden provocar inhibición del proceso y condiciones no óptimas para la actividad microbiana.

CAPITULO 3 Análisis y discusión de resultados

3.1 Metodología de estudio

Conocer el potencial de generación de biogás que tiene la biomasa depende de varios factores como lo son las características fisicoquímicas, el tipo de tecnología del biodigestor, parámetros operativos del digestor, del sustrato, entre otros. Por lo que la mejor manera de estimar el potencial de biogás es realizando pruebas experimentales; sin embargo, este es un proceso que demanda tiempo, recursos económicos, equipo especializado, entre otros. Por otro lado, cuando se desean realizar estudios de Co-DA los factores antes mencionados se incrementan significativamente, por lo que es fundamental desarrollar una metodología que permita el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles. Todo lo anterior con la finalidad de determinar las proporciones de residuos que componen el sustrato para la máxima generación de biogás posible. En la figura 3 se presenta un esquema con la metodología general utilizada en este estudio. Se puede observar que consta de tres etapas las cuales se detallan a continuación:

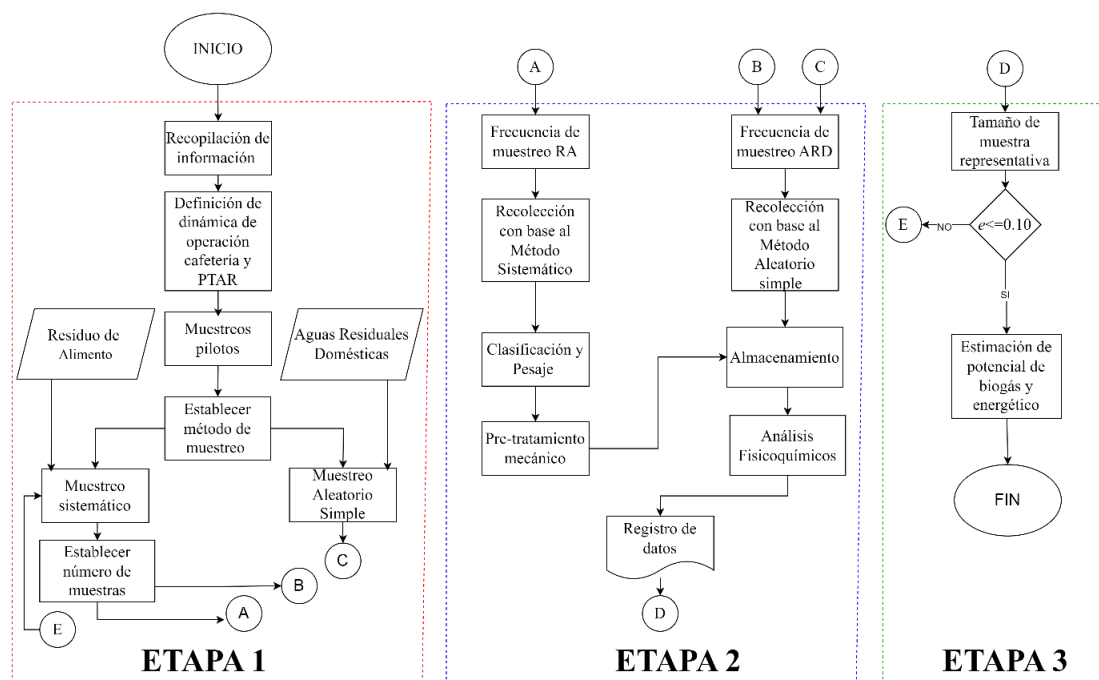


Figura 3: Metodología general para el estudio de la biomasa para su aprovechamiento en un proceso de co-digestión anaeróbica.

Etapa 1: Metodología para cuantificar y caracterizar los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales de la UABC campus Mexicali I.

1. *Recopilación, procesamiento y análisis de la información bibliográfica.*

Búsqueda de metodologías de caracterización y muestreo de residuos sólidos orgánicos y aguas residuales, para estimar la producción de biogás a través de un proceso de co-digestión anaeróbica.

2. *Definición de dinámica de operación cafetería y PTAR.*

Residuos de Alimento (RA)

El Campus Mexicali I de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) es un complejo educativo que alberga a las facultades de Arquitectura y Diseño, Ingeniería y Derecho. El Campus Mexicali I, cuenta con un Centro Comunitario Estudiantil (32° 37' 57.505" N 115° 26' 39.805" W) en donde los estudiantes pueden acudir para la compra de alimentos (ver figura 4). Durante el año 2023, el Centro Comunitario estuvo conformado por cuatro locales, cada uno con un menú particular. En dos locales se tenía el servicio de lonchería y vendían alimentos como burritos de guisado, tortas, sándwiches, entre otros; en un tercer local se vendían pizzas y en el cuarto local se el giro era la venta de jugos principalmente. La mayoría de estos locales contaban con la venta de productos empaquetados y embotellados de marcas comerciales reconocidas.

Actualmente en la UABC, se cuenta con un programa llamado “Cero Residuos”, el cual se enfoca en dar una gestión integral a los residuos sólidos. En primera instancia, se cuenta con una serie de contenedores ubicados en diferentes puntos del campus, los cuales están clasificados por color y definición del residuo que se debe disponer. La clasificación de estos contenedores es plástico, aluminio, orgánico e inorgánico. Los residuos que no son valorizados son llevados a contenedor principal y los valorizados son separados y trasladados a los distintos centros de acopio.

En primera instancia, un estudio optó por trabajar con base a este programa, enfocándose únicamente en la fracción orgánica. Sin embargo, se realizaron muestreos a la mayoría de contenedores de este programa con la finalidad de definir la cantidad del residuo y confirmar si la clasificación de los residuos estaba siendo respetada por el alumnado. Se determinó que la cantidad de materia orgánica dispuesta no era considerable y generalmente los estudiantes hacían una incorrecta disposición de residuos; por ejemplo, se encontró que se disponían bolsas de frituras manchadas con chile, platos manchados de comida, entre otras. También se realizó una inspección en los botes de basura que se encuentran en los comedores del Centro Comunitario y se observaron los mismos resultados. Por lo que se optó por trabajar con el residuo generado únicamente por los locales del Centro Comunitario antes mencionado.

Se realizó un acercamiento con los dueños (4, uno por cada local) de los establecimientos del Centro comunitario y con los encargados de turno (8, dos por cada local y uno del turno matutino y otro para el turno de la tarde), con la finalidad de conocer aspectos sobre la cantidad de generación de RA, cómo es la gestión de estos RA y su interés por colaborar en la presente investigación. Los resultados de este acercamiento es el siguiente:

1. Los locatarios se encargan de la recolección y disposición de los residuos que se generan en el Centro comunitario, por lo que pagan un servicio externo para disponer de sus RS.
2. Los RA son dispuestos en el contenedor principal de la UABC, en común acuerdo entre ambas partes.
3. Están interesados en colaborar en el presente estudio, siempre y cuando el estudio se lleve realmente a cabo. Lo anterior, debido a que en otras ocasiones se les ha pedido realizar separación de residuos, pero los anteriores proyectos han sido abandonados.
4. El horario establecido en que opera el Centro comunitario es de 7:00 am a 8:00 pm de lunes a viernes durante el periodo escolar. Sin embargo, cada locatario puede abrir o cerrar el local de manera indistinta.
5. Estimaron que el volumen generado de RA por local no supera los cinco galones.

Partiendo de la información anterior, se decidió adquirir cinco cubetas de plástico con capacidad de 19 L, una para cada local y uno extra para cualquier eventualidad. Se les comentó a los trabajadores que se daría inicio con algunos muestreos, y que la cubeta se les estaría dejando en la puerta del local a las 7:00 am y se estaría retirando a las 8:00 pm, comentando que de no acudir a la hora de cierre bastaba con que dejaran la cubeta afuera y que igualmente esta sería recogida. Lo anterior se debe a que los locatarios mencionaron que no cierran a la hora exacta de las 8:00 pm y en muchas ocasiones cierran antes el local; mientras que la apertura del local en ocasiones es después de las 7:00 am.

Aguas residuales

Por otro lado, para el acercamiento a la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales (PTAR) universitaria, ubicada en una esquina de la unidad deportiva con coordenadas $32^{\circ} 38' 3.816'' \text{ N}$ $115^{\circ} 26' 14.369'' \text{ W}$ 4373262158612 (figura 4) con una distancia de 700m aproximadamente del Centro Comunitario Estudiantil, se acudió al área de “Administración” ubicado en el Campus Mexicali I para pedir el permiso para la toma de muestras. En dicho acercamiento se detectó lo siguiente:

1. Se cuenta con 3 operadores, dos de lunes a viernes y uno en sábados y domingos, fue necesario acudir particularmente con cada uno y solicitarle su número telefónico para avisar con anterioridad el día que se tomarían la muestras de AR. Por lo anterior la PTAR opera 24 horas los 7 días de la semana, salvo cuando realizan la disposición de lodos y reactivación de la PTAR.
2. Se realizó un recorrido para identificar el punto para recoger las muestras y determinar el equipo necesario. Se detectó una toma (válvula de paso) para las aguas residuales que ingresan a la PTAR, por lo que se detectó que no era necesario realizar adecuaciones para la toma de muestras según lo establecido por la NMX-AA-003-1980 en el punto 5.2.

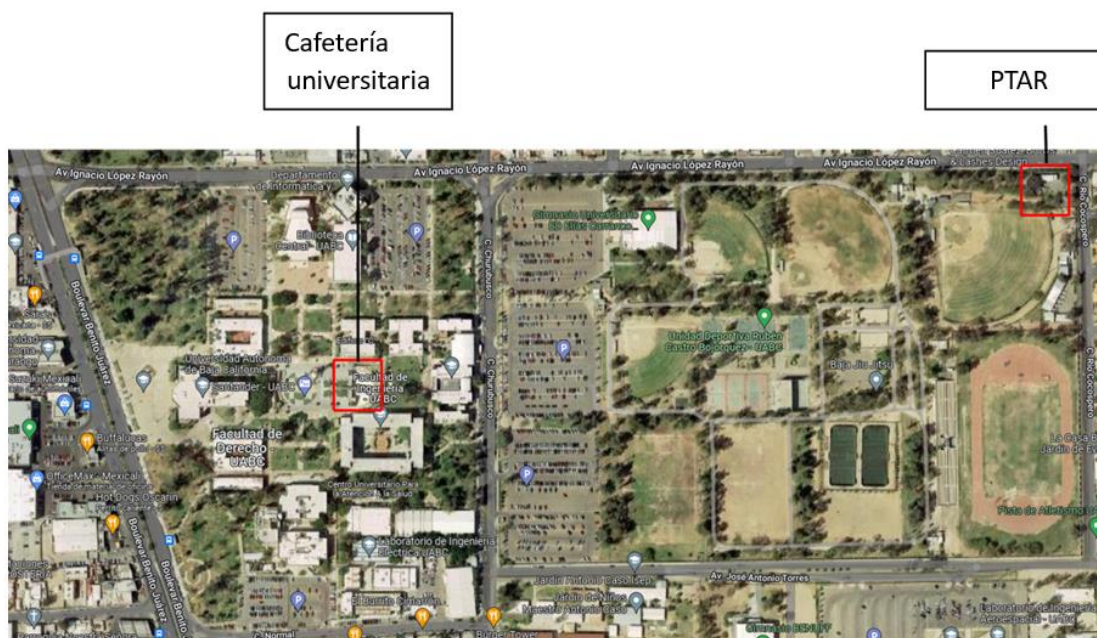


Figura 4: Ubicación del Centro Comunitario Estudiantil del Campus Mexicali I y la PTAR en unidad deportiva del mismo complejo.

3. *Muestreos pilotos.*

Residuos de Alimento (RA)

Como se comentó anteriormente, con base al acercamiento se determinó como se estaría trabajando. Primeramente, se inició de manera aleatoria una o dos veces por semana. Se llevaron las cubetas con sus respectivas tapas a los locales de Centro Comunitario. Uno de los primeros inconvenientes fue la comunicación entre los diferentes trabajadores de cada local, ya que al momento del acercamiento inicial no estaban presentes todos los trabajadores y a los que se les comentó la dinámica de trabajo olvidaron comunicar a los demás, por tanto, fue necesario realizar una capacitación sobre la separación, así como una explicación de proyecto con los trabajadores. Para llevar a cabo un mejor control, se tenía comunicación directa con los trabajadores a cargo, y mediante vía telefónica o WhatsApp se les notificaba sobre la realización del muestreo y de esta manera fue más sencillo que ellos comunicaran a todos los compañeros de trabajo. Una vez solucionado este primer reto, ocurrieron situaciones en las que:

- Se disponía el residuo antes de su recolección
- No se separaba el residuo en orgánico e inorgánico
- Se olvidaba colocar el RA en los contenedores
- Al momento de cierre no se sacaba la cubeta lo que impedía su recolección el mismo día
- Guardar RA de un día que no correspondía al muestreo

Además, como aplicadores, la cuestión de los horarios también juega un rol relevante, ya que el tráfico, actividades externas, emergencias, etc., influyen en la puntualidad de la entrega y al recoger los contenedores. Todas estas cuestiones fueron corregidas a lo largo de 3 meses aproximadamente que fue lo que aplicaron los muestreos pilotos. En ese periodo se fortaleció la comunicación entre aplicador y locatarios, el personal ya contaba con una capacitación de clasificación de orgánico e inorgánico y se generó confianza entre todos los involucrados.

La dinámica de trabajo mejoró y cambió durante estos tres meses de muestreos piloto, ya que todos los establecimientos cocinaban en la mañana y dejaban de cocinar alrededor de las 4:00pm-6:00pm lo que permitía recoger menos tarde los contenedores y clasificar los RA. Por tanto, se establecieron los siguientes criterios:

- La entrega de contenedores sería un día antes del muestreo aproximadamente a las 7:00 pm, para evitar impuntualidades por parte del aplicador al momento de la entrega ya que el RA se genera desde las 7:00 am.
- Se les notificaba a los trabajadores que sólo deberían recolectar los residuos del día de interés, con la finalidad de evitar que se mezclaran RA de días distintos al de muestreo. Toda esta dinámica se realizaba por WhatsApp y en ocasiones de manera adicional en forma presencial.
- Se llegó al acuerdo entre el aplicador y los trabajadores a cargo de avisar sobre eventualidades como: cerrar temprano, posible generación de RA muy baja o nula, apertura después del horario fijado o en caso de ser necesario la necesidad de llevar otro contenedor.

Aguas residuales

Para la PTAR, al igual que con los RA, se realizaron acercamientos de manera aleatoria, sin embargo, los técnicos operaban con los siguientes horarios:

Tabla 2.- Horario de operadores de la PTAR.

Técnicos	Días	Horario
2	Lunes a Viernes	6:00am a 2:00pm y 2:00pm a 10:00pm
1	Sábado y Domingo	Indefinido

Debido a esto, se tuvieron que turnar los muestreos con cada uno de los técnicos para que todos estuvieran enterados del aplicador y facilitar el acceso a la PTAR.

Las principales consideraciones para el muestreo de las AR fueron las siguientes:

- Debido a la distancia fue necesario llevar una hielera almacenar los frascos.
- Se utilizaron recipientes de 32oz de vidrio con tapa de metal, para tener un sello hermético.
- Se utilizó Equipo de Protección Personal (EPP) como bata, lentes de seguridad, cubre bocas, guantes, así como ropa y calzado adecuado.

4. Establecer método de muestreo y número de muestras.

Como se mencionó en el capítulo 1 y 2 de este documento, cuando el muestreo es en el sitio de generación, los métodos de muestreo suelen presentar heurística por los aplicadores para establecer los criterios de muestreo. Sin embargo, en este estudio se plantea un método en el que los criterios de muestreo sean estandarizados y sobre todo que se fundamenten estadísticamente. Según diversos autores, los residuos de alimentos presentan una gran variabilidad en cantidad de generación y composición, por lo que se debe establecer un método de muestreo que permita evaluar los distintos escenarios de generación de RA (Rakić et al., 2024); por lo que el muestreo sistemático permite muestrear de manera ordenada, además de poder contemplar distintos días de la semana con la finalidad de considerar la variabilidad. Lo anterior es posible ya que, en el calendario escolar de la UABC hay varios días de asueto, lo que permite abarcar distintos días de muestreo. Para el caso de las aguas residuales, al tener una operación de lunes a domingo, al contemplar un muestreo sistemático el muestreo podría caer en el mismo día, por lo que se decidió utilizar un muestreo aleatorio simple, con la finalidad de realizar los muestreos que contemplen la variabilidad y que además se pueda muestrear en distintos horarios del día.

Para llevar a cabo el método sistemático y el método aleatorio simple, se consideró lo siguiente:

1. Para los RA, se consideran sólo los días hábiles de operación de cada zona de interés en función del calendario oficial de la UABC. Se descartan los días sábado y domingo, así como los de asueto.
2. Para las AR, se consideraron los días de lunes a domingo durante el periodo del ciclo escolar establecido en el calendario oficial de la UABC.
3. Se consideran 17 semanas en los periodos 2023-1 y 2023-2 para ambos residuos.

Método sistemático para RA

Una vez plasmados los días de operación, se enumeran del primer día al último, como se observa en la Figura 5. Se puede observar que en el ciclo escolar 2023-1 se contabilizaron 77 días representando el número de población N correspondiente a la ecuación (1) mostrada en el capítulo 2 de este documento. Es importante resaltar que caracterización fisicoquímica es un aspecto a considerar pues demanda recursos económicos, equipo especializado, reactivos, así como el factor tiempo. Para poder conseguir los parámetros de %de humedad, Sólidos totales, Sólidos volátiles, Sólidos fijos, % de sólidos volátiles, % de sólidos fijos, DQO, C y N; de una muestra de residuos, el tiempo puede llevar entre 3-5 días debido a la capacidad de los equipos de laboratorio, así como del almacenamiento de los residuos. Lo anterior, limita a que sólo se pueda hacer una caracterización por semana. Por tanto, el número de muestreos por periodo escolar es de n=17, que el número de semanas del ciclo escolar.

Para obtener el periodo o frecuencia de muestreo (k) para, se aplicó la ecuación (1) y se obtuvo un valor de 5 el cual representa los saltos de días en el muestreo (ver ecuación 2). Para establecer el arranque de las muestras, se tomaron los primeros 5 días que corresponden a la primera semana (lunes a viernes/1 a 5) y se aplicó un método aleatorio simple resultando A=5 representando el primer día de muestreo.

$$K = \frac{77}{17} = 4.53 \approx 5 \quad (\text{ec 2})$$

Este valor de arranque resultante de “A”, se le va sumando el valor de “K” de manera consecutiva para establecer los días de muestreo hasta alcanzar el valor de “N”, como se muestra en la Tabla 3. Es importante destacar que no se abarcan en su totalidad las 17 muestras que se buscan, siguiendo los saltos establecidos por “K”, debido a los días de asueto; por lo que se aplicó por individual a cada semana faltante un método aleatorio simple, estableciendo como días de muestreo el martes 07 de febrero y el viernes 12 de mayo, los cuales se encuentran marcados con * en la Tabla 3. Con lo anterior se completaron las 17 fechas de muestreo para el periodo 2023-1.

Tabla 3.-Días de muestreo para RA por el método sistemático del semestre 2023-1.

RESIDUOS DE ALIMENTOS		
MES	FECHA DE MUESTREO	# DE POBLACIÓN (N)
FEBRERO	VIERNES 03	5
FEBRERO	MARTES 07*	6
FEBRERO	LUNES 13	10
FEBRERO	LUNES 20	15
FEBRERO	MARTES 28	20
MARZO	MARTES 07	25
MARZO	MARTES 14	30
MARZO	JUEVES 23	35
MARZO	JUEVES 30	40
ABRIL	JUEVES 13	45
ABRIL	JUEVES 20	50
ABRIL	JUEVES 27	55
MAYO	VIERNES 05	60
MAYO	VIERNES 12*	63

MAYO	MIÉRCOLES 17	65
MAYO	MIÉRCOLES 24	70
MAYO	MIÉRCOLES 31	75

Aplicando lo anterior para el ciclo 2023-2 se obtiene que $K=5$, y para el arranque de muestreo después de aplicar un método aleatorio simple se tiene $A=3$; por lo que se establecen los días de muestreo como se observa en la Tabla 4.

$$K = \frac{83}{17} = 4.88 \approx 5 \quad (\text{ec } 3)$$

Tabla 4.-Días de muestreo para RA por el método sistemático del semestre 2023-2.

RESIDUOS DE ALIMENTOS		
MES	FECHA DE MUESTREO	#
AGOSTO	MIÉRCOLES 09	3
AGOSTO	MIÉRCOLES 16	8
AGOSTO	MIÉRCOLES 23	13
AGOSTO	MIÉRCOLES 30	18
SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES 06	23
SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES 13	28
SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES 20	33
SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES 27	38
OCTUBRE	MIÉRCOLES 04	43
OCTUBRE	MIÉRCOLES 11	48
OCTUBRE	MIÉRCOLES 18	53
OCTUBRE	MIÉRCOLES 25	58
NOVIEMBRE	MIÉRCOLES 01	63
NOVIEMBRE	JUEVES 09	68
NOVIEMBRE	JUEVES 16	73
NOVIEMBRE	VIERNES 24	78
NOVIEMBRE	VIERNES 01	83

Método aleatorio simple para aguas residuales

Para la aplicación del método aleatorio simple para las aguas residuales, se separaron las semanas, tomando lunes como el inicio de esta y el domingo como su día final. Para cada semestre se contaba con un número de 17 semanas, lo que da un total de 34 semanas en todo el año escolar a las cuales se les aplico este método.

En la figura 5 se presentan los días de muestreo para los RA y AR, en función del calendario de la UABC para los periodos 2023-1 y 2023-2. Se puede observar que los días marcados con N/A corresponden a los fines de semana y días de asueto. Por otra parte, se marcan los días en los que coincidió el mismo día de muestreo para ambos residuos. Los días marcado en color marrón,

representa que se tuvo que hacer un cambio en el día de muestreo, debido a eventos que no se tenían contemplados como las condiciones ambientales, por ejemplo: lluvia, temblores, entre otros.

Tabla 5.- Días de muestreo para aguas residuales por el método aleatorio simple del semestre 2023-1 y 2023-2.

AGUAS RESIDUALES			
2023-1		2023-2	
MES	FECHA DE MUESTREO	MES	FECHA DE MUESTREO
FEBRERO	VIERNES 03	AGOSTO	DOMINGO 13
FEBRERO	SÁBADO 11	AGOSTO	SÁBADO 19
FEBRERO	DOMINGO 19	AGOSTO	VIERNES 25
FEBRERO	JUEVES 23	SEPTIEMBRE	SÁBADO 02
MARZO	MIÉRCOLES 01	SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES 06
MARZO	DOMINGO 12	SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES 13
MARZO	VIERNES 17	SEPTIEMBRE	DOMINGO 24
MARZO	JUEVES 23	SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES 27
MARZO	LUNES 27	OCTUBRE	SÁBADO 07
ABRIL	DOMINGO 16	OCTUBRE	DOMINGO 15
ABRIL	JUEVES 20	OCTUBRE	JUEVES 19
ABRIL	DOMINGO 30	OCTUBRE	MARTES 24
MAYO	MIÉRCOLES 03	OCTUBRE	MARTES 31
MAYO	DOMINGO 14	NOVIEMBRE	VIERNES 10
MAYO	MIÉRCOLES 17	NOVIEMBRE	DOMINGO 19
MAYO	MIÉRCOLES 24	NOVIEMBRE	JUEVES 23
MAYO	MIÉRCOLES 31	NOVIEMBRE	LUNES 27

CICLO ESCOLAR 2023-1							
ENERO		MARZO		ABRIL		MAYO	
LUNES 30	1	MIÉRCOLES 01	21	SÁBADO 01	N/A	LUNES 01	N/A
MARTES 31	2	JUEVES 02	22	DOMINGO 02	N/A	MARTES 02	57
FEBRERO		VIERNES 03	23	LUNES 03	N/A	MIÉRCOLES 03	58
MIÉRCOLES 01	3	SÁBADO 04	N/A	MARTES 04	N/A	JUEVES 04	59
JUEVES 02	4	DOMINGO 05	N/A	MIÉRCOLES 05	N/A	VIERNES 05	60
VIERNES 03	5	LUNES 06	24	JUEVES 06	N/A	SÁBADO 06	N/A
SÁBADO 04	N/A	MARTES 07	25	VIERNES 07	N/A	DOMINGO 07	N/A
DOMINGO 05	N/A	MIÉRCOLES 08	26	SÁBADO 08	N/A	LUNES 08	N/A
LUNES 06	N/A	JUEVES 09	27	DOMINGO 09	N/A	MARTES 09	61
MARTES 07	6	VIERNES 10	28	LUNES 10	42	MIÉRCOLES 10	N/A
MIÉRCOLES 08	7	SÁBADO 11	N/A	MARTES 11	43	JUEVES 11	62
JUEVES 09	8	DOMINGO 12	N/A	MIÉRCOLES 12	44	VIERNES 12	63
VIERNES 10	9	LUNES 13	29	JUEVES 13	45	SÁBADO 13	N/A
SÁBADO 11	N/A	MARTES 14	30	VIERNES 14	46	DOMINGO 14	N/A
DOMINGO 12	N/A	MIÉRCOLES 15	N/A	SÁBADO 15	N/A	LUNES 15	N/A
LUNES 13	10	JUEVES 16	31	DOMINGO 16	N/A	MARTES 16	64
MARTES 14	11	VIERNES 17	32	LUNES 17	47	MIÉRCOLES 17	65
MIÉRCOLES 15	12	SÁBADO 18	N/A	MARTES 18	48	JUEVES 18	66
JUEVES 16	13	DOMINGO 19	N/A	MIÉRCOLES 19	49	VIERNES 19	67
VIERNES 17	14	LUNES 20	N/A	JUEVES 20	50	SÁBADO 20	N/A
SÁBADO 18	N/A	MARTES 21	33	VIERNES 21	51	DOMINGO 21	N/A
DOMINGO 19	N/A	MIÉRCOLES 22	34	SÁBADO 22	N/A	LUNES 22	68
LUNES 20	15	JUEVES 23	35	DOMINGO 23	N/A	MARTES 23	69
MARTES 21	16	VIERNES 24	36	LUNES 24	52	MIÉRCOLES 24	70
MIÉRCOLES 22	17	SÁBADO 25	N/A	MARTES 25	53	JUEVES 25	71
JUEVES 23	18	DOMINGO 26	N/A	MIÉRCOLES 26	54	VIERNES 26	72
VIERNES 24	19	LUNES 27	37	JUEVES 27	55	SÁBADO 27	N/A
SÁBADO 25	N/A	MARTES 28	38	VIERNES 28	56	DOMINGO 28	N/A
DOMINGO 26	N/A	MIÉRCOLES 29	39	SÁBADO 29	N/A	LUNES 29	73
LUNES 27	N/A	JUEVES 30	40	DOMINGO 30	N/A	MARTES 30	74
MARTES 28	20	VIERNES 31	41			MIÉRCOLES 31	75
		NOMENCLATURA				JUNIO	
			Ambas			JUEVES 01	76
			RA			VIERNES 02	77
			Aguas residuales				
			Cambio				
CICLO ESCOLAR 2023-2							
AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE	
MARTES 01	N/A	VIERNES 01	20	DOMINGO 01	N/A	MIÉRCOLES 01	63
MIÉRCOLES 02	N/A	SÁBADO 02	N/A	LUNES 02	41	JUEVES 02	N/A
JUEVES 03	N/A	DOMINGO 03	N/A	MARTES 03	42	VIERNES 03	64
VIERNES 04	N/A	LUNES 04	21	MIÉRCOLES 04	43	SÁBADO 04	N/A
SÁBADO 05	N/A	MARTES 05	22	JUEVES 05	44	DOMINGO 05	N/A
DOMINGO 06	N/A	MIÉRCOLES 06	23	VIERNES 06	45	LUNES 06	65
LUNES 07	1	JUEVES 07	24	SÁBADO 07	N/A	MARTES 07	66
MARTES 08	2	VIERNES 08	25	DOMINGO 08	N/A	MIÉRCOLES 08	67
MIÉRCOLES 09	3	SÁBADO 09	N/A	LUNES 09	46	JUEVES 09	68
JUEVES 10	4	DOMINGO 10	N/A	MARTES 10	47	VIERNES 10	69
VIERNES 11	5	LUNES 11	26	MIÉRCOLES 11	48	SÁBADO 11	N/A
SÁBADO 12	N/A	MARTES 12	27	JUEVES 12	49	DOMINGO 12	N/A
DOMINGO 13	N/A	MIÉRCOLES 13	28	VIERNES 13	50	LUNES 13	70
LUNES 14	6	JUEVES 14	29	SÁBADO 14	N/A	MARTES 14	71
MARTES 15	7	VIERNES 15	30	DOMINGO 15	N/A	MIÉRCOLES 15	72
MIÉRCOLES 16	8	SÁBADO 16	N/A	LUNES 16	51	JUEVES 16	73
JUEVES 17	9	DOMINGO 17	N/A	MARTES 17	52	VIERNES 17	74
VIERNES 18	10	LUNES 18	31	MIÉRCOLES 18	53	SÁBADO 18	N/A
SÁBADO 19	N/A	MARTES 19	32	JUEVES 19	54	DOMINGO 19	N/A
DOMINGO 20	N/A	MIÉRCOLES 20	33	VIERNES 20	55	LUNES 20	N/A
LUNES 21	11	JUEVES 21	34	SÁBADO 21	N/A	MARTES 21	75
MARTES 22	12	VIERNES 22	35	DOMINGO 22	N/A	MIÉRCOLES 22	76
MIÉRCOLES 23	13	SÁBADO 23	N/A	LUNES 23	56	JUEVES 23	77
JUEVES 24	14	DOMINGO 24	N/A	MARTES 24	57	VIERNES 24	78
VIERNES 25	15	LUNES 25	36	MIÉRCOLES 25	58	SÁBADO 25	N/A
SÁBADO 26	N/A	MARTES 26	37	JUEVES 26	59	DOMINGO 26	N/A
DOMINGO 27	N/A	MIÉRCOLES 27	38	VIERNES 27	60	LUNES 27	79
LUNES 28	16	JUEVES 28	39	SÁBADO 28	N/A	MARTES 28	80
MARTES 29	17	VIERNES 29	40	DOMINGO 29	N/A	MIÉRCOLES 29	81
MIÉRCOLES 30	18	SÁBADO 30	N/A	LUNES 30	61	JUEVES 30	82
JUEVES 31	19			MARTES 31	62	DICIEMBRE	
						VIERNES 01	83

Figura 5: Calendario de muestreo 2023-1/2023-2.

Etapas 2: Recolección, Cuantificación y caracterización los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales de la UABC.

1. *Recolección con base al método sistemático para RA y método aleatorio simple para ARD.*

Residuos de Alimento (RA)

Estos residuos se recolectaron del Centro Comunitario de la UABC Campus I de Mexicali, y las muestras fueron depositadas en contenedores de plástico establecidos en la etapa 1, como se observa en la Figura 6. Para el muestreo de RA se observó que durante todos los muestreos los contenedores de 19 L son suficientes para almacenar el RA generado (uno para cada local). Dichos contenedores se dejaron en la noche un día antes muestrear o en horas de apertura el mismo día que se buscaba el muestreo, como se estableció en la etapa 1. En la figura 7 se observan los contenedores ubicados en las inmediaciones de los locales de comida.

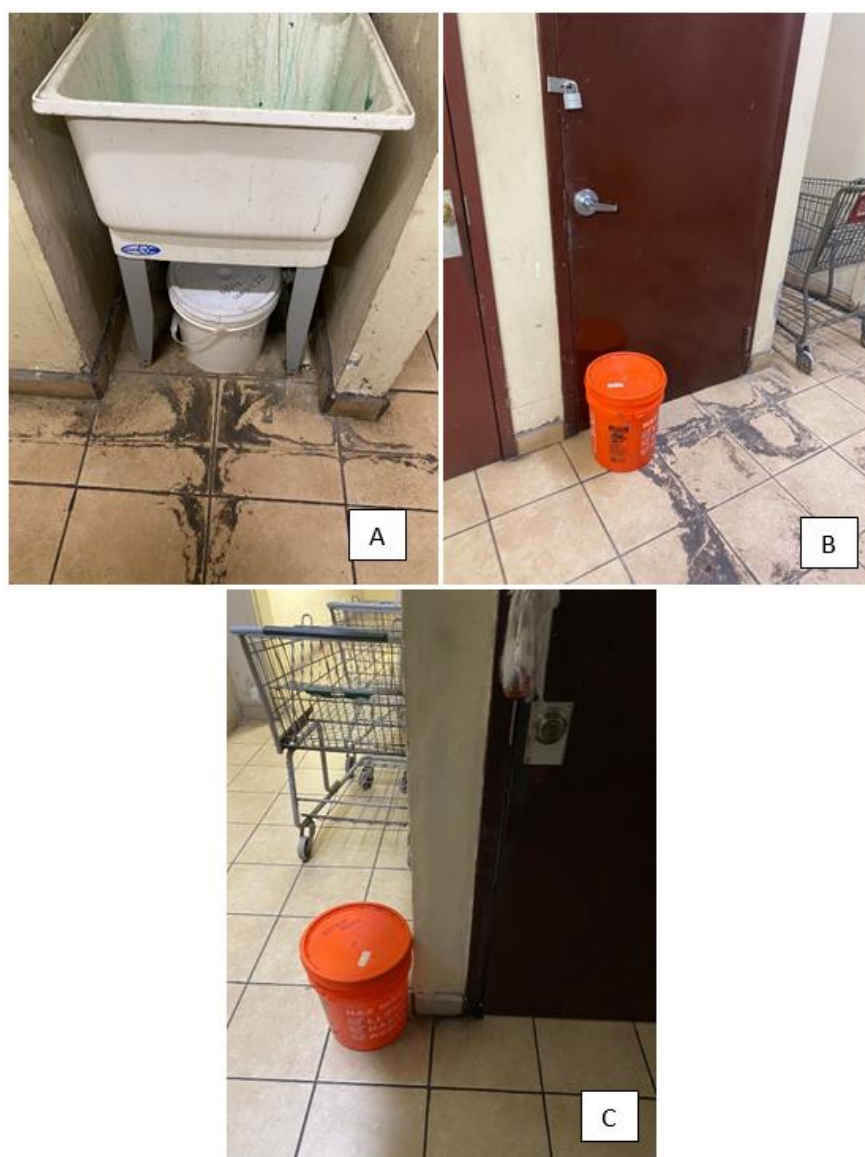


Figura 6: Entrega de contenedores a locatarios para muestreo de RA.



Figura 7: Recolección de RA en cubetas trasladados a laboratorio.

Aguas residuales

Se tomaron muestras de la planta de tratamiento de agua residual de la UABC. Las muestras fueron recolectadas en frascos de vidrio según la NMX-AA-003-1980 y NMX-AA-034-SCFI-2015.



Figura 8: Etiquetado de frascos de AR.

NOTA: En ambos casos (sólo si aplica), se debe separar manualmente cualquier residuo inorgánico como bolsas de plástico, empaques, latas, etc, como se observa en las Figuras 8, 9 y 10.



Figura 9: Retirando plástico del RA.



Figura 10: Retirando papel del RA.

2. *Clasificación y pesaje.*

Residuos de Alimento (RA)

Se identificaron los tipos de residuos recolectados (vegetales, frutas, comida cocida, cueros, huesos, pan, arroz, etc.) y pesar en una báscula. Este procedimiento se realiza según el día seleccionado por el método sistemático (Figura 11 y 12).



Figura 11: Pesaje de Lechuga Romana.



Figura 12: Separación de RSO por grupos.

3. Pre-tratamiento y almacenamiento.

Residuos de Alimento (RA)

Debido a que los residuos de comida son de gran tamaño, para facilitar su caracterización es necesario realizar un pre-tratamiento mecánico, que consiste en triturarlos para reducir el tamaño de partícula ($< 5\text{mm}$). La trituración de los residuos se hará diariamente, cada tres días o semanalmente; dependiendo de la cantidad de residuos generados en la cafetería (figura 13).



Figura 13: Etapas de pre-tratamiento del RA.

4. Almacenamiento.

Residuos de Alimento (RA)

Una vez triturada la materia orgánica, se debe colocar en un recipiente de plástico hermético y almacenarse a una temperatura menor a 10 °C, esto ayuda a mantener el residuo bajo las mismas condiciones en que fue recolectado, evitando su degradación, ya que se tomarán muestras para la caracterización físico-química del residuo.



Figura 14: Almacenamiento de RA a 0 °C para preservación de parámetros fisicoquímicos.

NOTA: De todo el residuo sólido orgánico recolectado en la semana, sólo se almacenará una muestra representativa para los análisis físico-químicos.

Aguas residuales

Se debe colocar en un recipiente de vidrio hermético y almacenarse a una temperatura entre 4°C y 10°C para evitar su degradación, ya que se tomarán muestras para la caracterización fisicoquímica del agua residual según la NMX-AA-034-SCFI-2015 y su muestreo será realizado según la NMX-AA-003-1980.

Análisis fisicoquímicos.

Residuos sólidos orgánicos y aguas residuales

Los análisis físico-químicos a los residuos recolectados, se realizan determinando cada uno de los parámetros que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.- Parámetros de análisis fisicoquímicos de los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales. Modificado de Nakasima, et al., 2017.

Parámetro	Unidad de medida	Método de análisis	Otro método de análisis
Temperatura	°C	NMX-AA-007-SCFI-2013	-
pH	-	NMX-AA-25-1984	-
Densidad	g/L	NOM-021-RECNAT-2000	-
Humedad	%	NMX-AA-016-1984	-
Sólidos totales	mg ST/L	NMX-AA-034-SCFI-2015	-
Sólidos volátiles totales	mg ST/L	NMX-AA-034-SCFI-2015	-
Sólidos fijos totales	mg SFT/L	NMX-AA-034-SCFI-2015	-
Sólidos volátiles totales	%	Montes M., 2008	-
Cenizas	%	Montes M., 2008	-
Demanda Química de Oxígeno	mg DQO/L	USEPA	NMX-AA-030-SCFI-2001
Relación C/N	-	(C) Hach Method 10128 (N) Hach Method 10072	NMX-AA-089/2-SCFI-2010 NMX-AA-024-1984
Temperatura	°C	NMX-AA-007-SCFI-2013	-
pH	-	NMX-AA-25-1984	

Etapas 3. Estimación teórica del potencial de producción de biogás y su aprovechamiento energético.

Etapas 3. Estimación teórica del potencial de producción de biogás y su aprovechamiento energético.

Cálculo de tamaño de muestra

La estimación del tamaño de muestra representativa se basa en la siguiente ecuación

$$n = \frac{N Z^2 \sigma^2}{(N-1) e^2 + Z^2 \sigma^2} \quad (\text{ec } 4)$$

Donde:

- n=tamaño de muestra representativa
- Z=1.96=valor de la desviación estándar según el valor de confianza
- $\sigma^2=0.25$ =varianza
- e=0.05=error de la muestra definido por el aplicador
- N=160=tamaño de la población.

Sustituyendo:

$$n = \frac{160 \cdot 1.96^2 \cdot 0.5^2}{(160-1) \cdot 0.05^2 + 1.96^2 \cdot 0.5^2} = 113.16 \approx 113 \quad (\text{ec } 5)$$

La ecuación del tamaño de muestra (n) indica que se debe realizar un muestreo de 116 muestras durante los 160 días que son el total de la población. Esto indica que se tendría que estar haciendo un muestreo casi diario, sin embargo, lo que se buscan en este estudio es establecer cuáles son los parámetros representativos fisicoquímicamente, por lo que realizar un muestreo todos los días no es recomendable dado el tiempo de los análisis y el costo de los reactivos.

Por tanto, se evaluó error que se tiene con las 34 muestras establecidas anteriormente, ya que esto es lo alcanzable para la realización de los estudios fisicoquímicos. Lo anterior debido a los costos en reactivos, la capacidad de almacenamiento (no era posible el almacenamiento en grandes cantidades y en periodos largos de tiempo).

Despejando el error e de la ecuación el anterior se obtiene:

$$e = \sqrt{\frac{\frac{N Z^2 \sigma^2}{n} - Z^2 \sigma^2}{N-1}} \quad (\text{ec } 6)$$

Sustituyendo valores:

$$e = \sqrt{\frac{\frac{160 \cdot 1.96^2 \cdot 0.5^2}{34} - 1.96^2 \cdot 0.5^2}{160-1}} = 14.96 \quad (\text{ec } 7)$$

Los 34 muestreos representan el 21.25% del total de la población, con lo que se obtiene un error de 14.96%, aparentemente este error puede considerarse alto dentro de la estadística, sin embargo, la mayoría de autores mencionan que cuando se tienen eventos con gran variabilidad es posible manejar un error mayor. Por otra parte, en el presente proyecto de tesis el enfoque no es determinar la cantidad de generación de RA como tal, sino más bien conocer la composición fisicoquímica del RA, por lo que se puede considerar aceptable el 15% de error. Estadísticamente el error máximo aceptable es del 10%, pero esto implicaría realizar prácticamente dos años de muestreo o bien dos muestreos por

semana, lo que hace que trabajar con este error no sea posible, por lo mencionado anteriormente. En la Tabla 7, se observa la cantidad de muestreos que se necesitan para un error del 5, 10 y 15%.

Tabla 7.-Cantidad de muestreo para diferentes valores de error.

Error	n
5%	113.163
10%	60.25
15%	33.862

1. Estimación de potencial de biogás y energético

Con los resultados obtenidos en la caracterización de los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales, se realizará el modelado matemático propuesto por Nakasima, et al., (2014), para estimar el potencial de producción de biogás, metano y energía eléctrica/térmica. Cabe mencionar que la estimación de producción de biogás depende del tipo de tecnología de digestión anaeróbica. Donde el estudio detallado se mostrará en el Capítulo 3.

$$P_{biogás} = CMOVR \times F_{biogás} \text{ (ec 8)}$$

- $P_{biogás}$: Producción de biogás ($m^3/día$)
- $f_{biogás}$: Factor de biogás (m^3/kg SV)
- CMOVR: Carga de Materia Orgánica Volátil del Residuo ($kg/día$)

También para el cálculo potencial de potencial de metano y el potencial energético tenemos:

- P_{CH_4} =Potencial de metano ($m^3/día$)
- $P_{biogás}$ = Potencial de biogás ($m^3/día$)
- $f_{Cmetano}$ = Factor de metano (Unidimensional)

$$P_{ener} = P_{biogás} \times EP \text{ (ec 9)}$$

- P_{ener} =Potencial de energía ($kWh/día$)
- EP =Equivalente producción de energía eléctrica (kWh/m^3)

3.2 Resultados de caracterización fisicoquímica de RA y aguas residuales

En el presente estudio se determina el potencial de generación de biogás que tienen la Co-DA de los RA del Centro comunitario del Campus Mexicali I de la UABC, con las aguas residuales domésticas del complejo deportivo de la UABC. Como punto de partida, es crucial llevar a cabo la caracterización físico-química de estos residuos, con la finalidad de reducir los niveles de incertidumbre en la estimación teórica de generación de biogás.

Como ya se mencionó anteriormente, para llevar a cabo la caracterización de los residuos mencionados, se realizaron 17 muestreos para los semestres 2023-1 y 2023-2, respectivamente. Es importante destacar que la separación de los RA de cada local lo estuvieron realizando directamente los empleados de los locales, facilitando el tiempo de muestreo significativamente; pero la clasificación y pesaje de los RA fue realizada por el aplicador. Por otro lado, el muestreo de ARD se

realizó directamente por el aplicador en distintas horas del día, con la intención de abarcar mayor variabilidad. Los horarios de muestreo de ARD se determinaron de manera aleatoria. Los resultados de la caracterización de los AR y ARD, se presentan en el siguiente orden: 1) la generación de RA para los semestres 2023-1 y 2023-2; 2). Clasificación de los principales grupos de alimentos; 3) parámetros físico-químicos para los AR y ARD, 4) el análisis estadístico de dichos parámetros y 5) Estimación teórica de producción de biogás, metano y generación de energía eléctrica.

En la Figura 15 y 16 se puede observar la generación diaria de RA y cómo dicha generación es variantes durante cada semana. El total de RA muestreados durante el semestre 2023-1 y 2023-2 fue de 130 kg y 80 kg, respectivamente. A pesar de que en el semestre 2023-2, al aplicar el muestreo sistemático, la mayoría de los días muestreados fue el día miércoles (ver Tabla 4 y figura 5); no se presentó una generación de RA que tendiera a ser constante, pero sí se mantuvo con valores menores a los generados en los semestres 2023-1. La variabilidad en la cantidad de generación de los RA se presenta independientemente del día de muestreo. Algunos locatarios, comentaron que los días lunes se suele preparar la comida que se venderá durante toda la semana y por consecuencia se tendría mayor generación de RA; sin embargo, en el semestre 2023-1 se muestreo el lunes 13 y 20 de febrero y no fueron los días con mayor generación de RA. Por lo que se puede ver que existe una gran variabilidad en la generación de RA. Existen muchos factores que afectan los niveles de generación de RA como lo son:

1. Organización interna de los trabajadores y dueños del local.
2. Algunos días de muestreo los trabajadores comentaron que se les olvidó separar RA y que estos habían sido dispuestos.
3. La afluencia de estudiantes en el centro comunitario afecta la generación de RA. Dicha afluencia depende de días festivos, condiciones climatológicas, periodos de exámenes, periodos festivos como la “semana de ingeniería”, ferias del libro, entre otras.

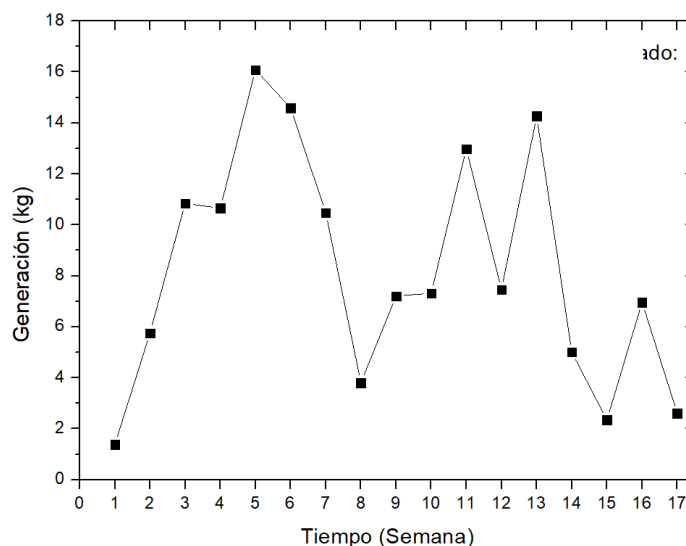


Figura 15: Generación de RA en 2023-1

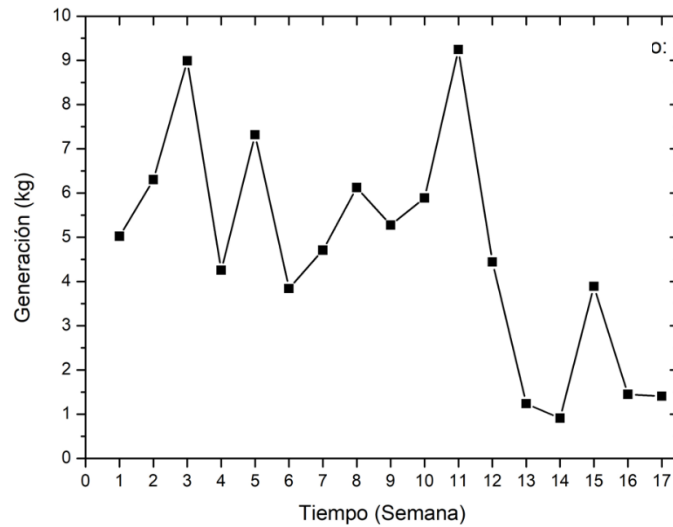


Figura 16: Generación RA en 2023-2.

Por otra parte, se realizó la clasificación de los diferentes tipos de alimentos que conforman el RA del Centro Comunitario de la UABC Campus Mexicali I (figura17). Se puede observar que la composición de los RA en función de los tipos de alimentos, para cada semestre también fue variante. Lo anterior muestra la complejidad que se tiene al caracterizar este tipo de alimentos, y sobre todo el impacto que tiene esta variabilidad para poder estimar el potencial de biogás. Algunas metodologías para estimar el potencial de biogás se basan en considerar grandes grupos de fuentes de alimentos como Verduras, frutas, carnes, pastas, entre otros y a partir de ahí estimar la factibilidad del aprovechamiento de estos residuos. Lo anterior presenta mucha incertidumbre, pero sí puede dar nociones si conviene o no realizar una inversión en el tratamiento de RA a partir de la DA o Co-DA. Por ejemplo, si la mayoría del RA fuera lechuga, se esperaría que la producción de biogás sea baja y por ende la pertinencia de la DA y Co-DA podría ser baja. Sin embargo, para los RA del Centro Comunitario se observa que hay una gran variedad grupos alimenticios, lo que no permite establecer una idea del rendimiento de biogás que pueden presentar este tipo de RA y fortalece la necesidad de llevar a cabo la caracterización fisicoquímica del RA.

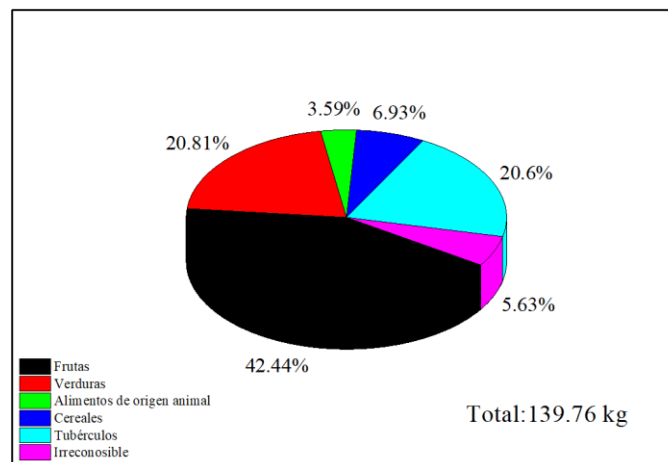


Figura 17: Composición de RA en 2023-1.

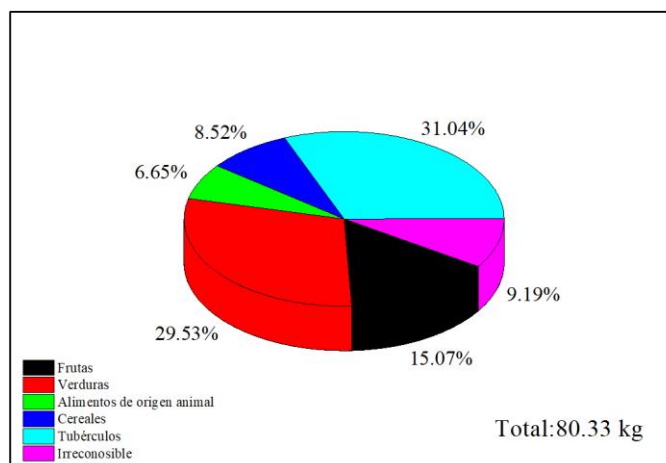


Figura 18: Composición de RA en 2023-2.

Por otra parte, en la Tabla 8 se presentan todos los tipos de alimentos que estuvieron presentes durante el semestre 2023-1 y 2023-2; mientras que en el Anexo A se presentan en las Tablas A1 y A2 los tipos RA encontrados durante cada semana de muestreo para los semestres 2023-1 y 2023-2, respectivamente.

Tabla 8.- Clasificación de RA muestreado en Periodo 2023-1 y 2023-2.

CICLO 2023-1		CICLO 2023-2	
Residuo	Peso	Residuo	PESO
Cascara de piña y corona	5028.4	Tallo de lechuga romana	14685.8
Tallo de lechuga romana	13171	Tallo de chile california	82
Tallo de chile california	1228.1	Cascara de aguacate con trazas de pulpa y semilla	3161
Hueso de aguacate (semilla)	3832.6	Cascara de cebolla blanca	1474.2
Cascara de aguacate con trazas de pulpa	161.9	Repollo picado	734.3
Cascara de cebolla blanca	3160.3	Cascara de plátano	1026
Repollo picado	754.15	Papa frita	985
Cascara de melón	4131.3	Carne de res	169.6
Pan de barra	1160.4	Vástago y centro de manzana verde	35
Cascara de plátano	922.5	Frijoles fritos	38.9
Papa frita	1917.7	Tomate picado	1063.1
Carne de res	707	Cascara de papa	20570.7
Vástago y centro de manzana verde	110	Cascara de naranja	6160.8
Frijoles fritos	4568.7	Limón amarillo picado	124.9
Tomate picado	3460.1	Cascara de cebolla morada	403.6
Cascara de papa	17506.8	Cascara de pepino	4258.2
Cascara de naranja	11074.5	Jícama picada	159.6
Limón amarillo picado	2259.9	Tortilla de harina	1414.9
Tallo de chile pimienta	401.09	Jamón	81.5
Cascara de cebolla morada	696.8	Tallo de chile serrano	71.3
Cascara de tomatillo	683.3	Birrote o bolillo	513.2
Cascara de pepino	7465.7	Limón Persia picado	220.91
Jícama picada	1688.7	Vástago y centro de manzana roja	167.2

Tortilla de harina	973.5	Queso amarillo	55
Bolonia	20.3	Cuernito	33.8
Jamón	68.8	Pollo con mayonesa	65
Tallo de chile serrano	22.2	Pan de barra integral	2364.9
Birote o bolillo	912.3	Pasta	1958.4
Vástago y centro de pera	328.6	Zanahoria rayada	3161.6
Limón persa picado	391.9	Tallo de chile jalapeño	634.1
Vástago y centro de manzana roja	460.9	Tortilla de maíz	278.5
Queso amarillo	48	Carne deshebrada	42.8
Hoja del perejil	77.2	Jitomate picado	412
Cuernito	252.5	Hoja de cilantro	210.6
Pollo con mayonesa	338.7	Cascara de huevo	156
Pan de barra integral	785.5	Cascara de papaya	140.8
Pasta	259.5	Hueso de res	1986.3
Zanahoria rayada	7684.6	Tomate Cherry	20.2
Tallo de chile jalapeño	1236.7	Tallo de chile de árbol	0.9
Taco de frijol	15	Tallo de chile Güero	22.2
Chile jalapeño en vinagre	36.1	Calabacita	206.5
Tortilla de maíz	752.4	Espárragos	156.9
Carne deshebrada	819.6	Champiñón	2.6
Jitomate picado	558	Tallo de chile morrón	254.6
Hoja de cilantro	154.4	Cascara de ajo	3.3
Cascara de kiwi	51.6	Jamaica	283.7
Cascara de sandia	3640.7	Chicharrón	70.4
Cascara de huevo	276.2	Acelga	89.4
hoja y tallo de betabel	924.4	Aceituna negra	2.4
Cascara de papaya	1764.5	Salchicha para asar (Buba)	6.9
Espinaca	469.3	Jamón	39.3
Pellejo	12.2	Muffin de chocolate	20.9
Hueso de res	1732.6	Waffle	148.2
Tallo de fresa	7495.7	Chicle	1.6
Salchicha	143.6	Col morada	74.4
Tomate Cherry	590.6	Pan para hot dog	18.9
Chuleta	649.6	Pavo (pavo y huesos chicos)	386.1
Tallo de chile de árbol	1	Pavo (huesos, cartílago y pavo)	2324.3
Cascara de guayaba	179	Irreconocible/Inseparable	7093.1
Tallo de chile Güero	32.7	TOTAL(g)	80328.31
Apio	795.5	TOTAL(kg)	80.33
Cascara de mango	5955.9		
Hueso del mango	4285.8		
Zanahoria con vinagre	91.9		
Tallo de cebolla cambray	22.8		
Calabacita	36.9		
Tamarindo	120.2		
Espárragos	180.2		
Champiñón	23.2		
Queso seco	26.4		
Tallo de chile morrón	21.1		

Cascara de ajo	0.5		
Jamaica	473.2		
Chicharrón	57.6		
Tocino	185.6		
Irreconocible/Inseparable	7233.3		
TOTAL(g)	139761.44		
TOTAL(kg)	139.76		

Para realizar la caracterización de los RA de y ARD se utilizaron las normas presentadas anteriormente en la Tabla 6. La caracterización se realizó siguiendo las condiciones mostradas en la Tabla 9, con la finalidad de caracterizar cada residuo de manera independiente y las distintas Co-DA. Por otra parte, es importante mencionar que las codas se estuvieron realizando 25% de RA y 75% de AR; 50% de RA y 50% de AR; y 75% de RA y 25% de AR, con la finalidad de conocer el efecto que se tiene en los parámetros fisicoquímicos al llevar a cabo las mezclas y encontrar cuál es la Co-DA que puede presentar mayor generación de biogás.

Tabla 9.- Nomenclatura a utilizar para interpretación de gráficas y tablas.

Abreviatura	Significado
RA	Residuos de Alimentos
25% (1:3)	25% de RA y 75% de AR
50% (1:1)	50% de RA y 50% de AR
75% (3:1)	75% de RA y 25% de AR
ARD	Aguas Residuales

Es importante mencionar que debido al costo económico que representan los reactivos de DQO, C y N; la caracterización para estos parámetros no se realizó por triplicado, pero para pH, densidad, humedad, %SF, %ST, %SV, SV (mg/L) y SF (mg/L) se realizaron las pruebas por triplicado. Durante las semanas 1 a la 16 del semestre 2023-1, se realizó la caracterización experimental para los RA, ARD y Co-DA propuestas. Se observó que, para todos los parámetros analizados, en la mayoría de los casos se respetaba una tendencia proporcional; por ejemplo, en la figura 19 se presentan los valores de densidad para los RA, ARD y Co-DAs, se observa que los límites máximo y mínimo corresponden a RA y ARD, respectivamente; y que al ir disminuyendo un 25% los RA su densidad también disminuía proporcionalmente. Lo anterior era una condición que era de esperarse, pero que tenía que ser corroborada, por lo que después de la semana cuatro del semestre 2023-2 se decidió estimar de manera teórica los valores de la Co-DA a partir de los valores obtenidos experimentalmente para los RA y ARD. También es importante mencionar que por problemas de operación del sistema de molienda de RA no fue posible realizar la caracterización durante las semanas 23, 24 y 25. Todos los valores de densidad presentados en la figura 19, se pueden consultar en la tabla B1 del Anexo B de este documento.

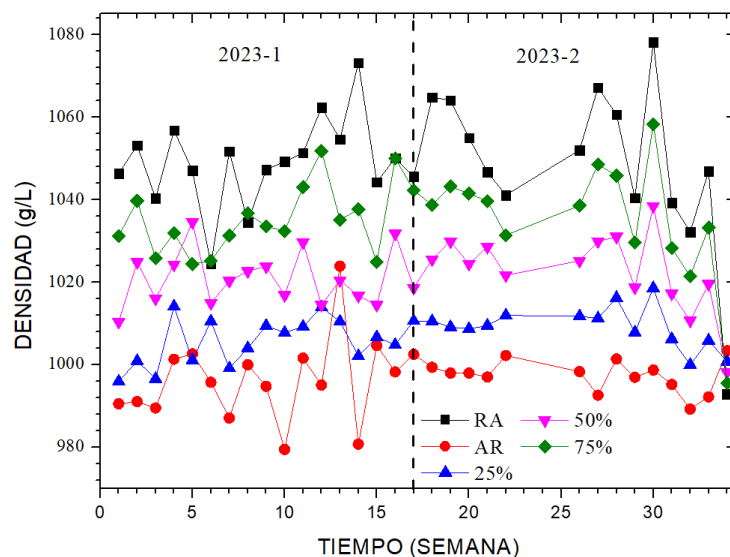


Figura 19: Densidad anual de los RA, AR y sus co-digestiones.

En la figura 20 se muestra el porcentaje de humedad y se puede observar que para las AR este parámetro tiende a ser constante, lo cual era de esperarse ya que prácticamente es agua. Sin embargo, para los RA el porcentaje de humedad fue favorable rondando entre el 75%-94%, dato relevante ya que corrobora que un proceso biológico es adecuado para el tratamiento de este residuo. Por otro lado, este rango de porcentaje de humedad, proporcionar condiciones favorables para la actividad microbiana en un biodigestor anaeróbico, ya que permite un adecuado desplazamiento de moléculas de mayor concentración a una de menor (difusión) en los sustratos y nutrientes en la mezcla, lo que favorece la actividad de los microorganismos y promueve una descomposición eficiente de la biomasa. Todos los valores de % de humedad presentados en la figura 20, se pueden consultar en la tabla B2 del Anexo B de este documento.

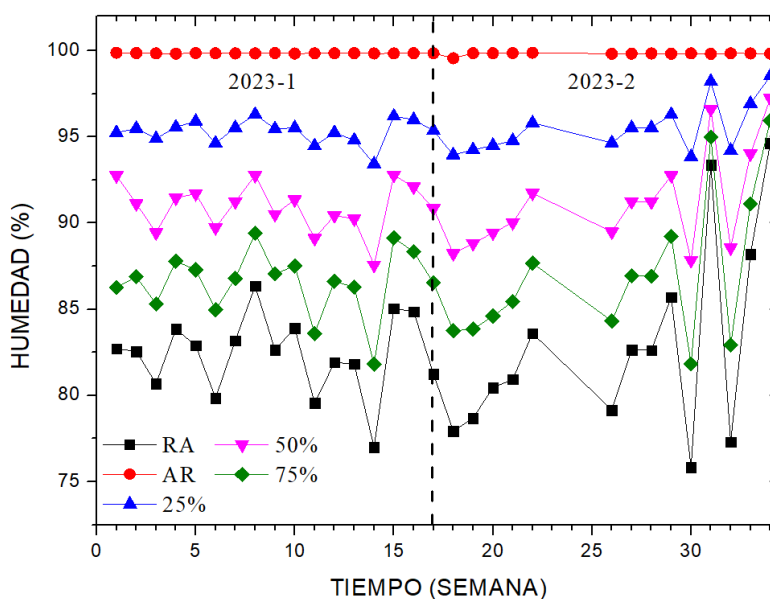


Figura 20: Porcentaje de humedad de los RA, AR y sus co-digestiones.

Una vez retirada la humedad de la muestra, queda el porcentaje de Sólidos Totales (%ST). En la figura 21 se puede observar que el RA contiene mayor materia sólida, por el contrario de las aguas residuales que muestran tener baja presencia de sólidos. El %ST está compuesto por el %SV y %SF en el que representan el porcentaje de materia sólida orgánica e inorgánica, respectivamente. En muchas ocasiones el %ST permite visualizar la posible pertinencia que tiene un residuo para ser convertida en biogás por un proceso de DA o Co-DA; sin embargo, es necesario conocer la cantidad de materia orgánica de los sólidos totales pues es lo que realmente será convertido en biogás. La materia orgánica es el "alimento" que permite que se lleve a cabo la actividad microbiana en un biodigestor anaeróbico y es fundamental para la generación de biogás. Por lo que, entre mayor sea este valor mayor se espera que se la generación de biogás, sin embargo, también depende de otros parámetros como el DQO, el pH y la relación C:N que permiten saber que tan aprovechable es dicha materia orgánica.

La variabilidad que se observa en los valores del %ST durante cada semana se debe principalmente a la composición del RA, sin embargo, se puede notar que en la mayoría de las semanas el %ST estuvo presentando valores en un rango del 15-20%, lo que al final muestra que esta composición no impactó de manera significativa en el %ST. Este amplio rango puede estar influenciado por la composición de los diferentes RA que se están co-digiriendo, así como por las prácticas de manejo y tratamiento de los mismos. Todos los valores de % ST presentados en la figura 21, se pueden consultar en la tabla B3 del Anexo B de este documento. Por otro lado, en la tabla B6 del Anexo B se presentan los valores de sólidos totales en mg/L y se puede observar que los valores promedio de ST para el RA fue aproximadamente de 180,657 mg/L, para las ARD de 1,528 mg/L, y para las co-digestiones de 46,827 mg/L; 89,937 mg/L y 134,410 mg/L, para 25%/75%; 50%/50% y 75%/50%, respectivamente. Lo anterior es importante, pues se suele manejar que con una concentración de sólidos totales en el extremo inferior del rango (50,000 mg/L) puede indicar una menor carga orgánica en el sustrato, lo que podría limitar la producción de biogás y la eficiencia del proceso de co-digestión. Por otro lado, concentraciones más altas de sólidos totales en el extremo superior del rango (250,000 mg/L) pueden sugerir una mayor disponibilidad de materia orgánica, lo que podría favorecer la producción de biogás. Sin embargo, concentraciones muy altas pueden también representar desafíos operativos en un biodigestor anaeróbico, como la necesidad de una mayor capacidad de tratamiento y un mayor control del proceso para evitar problemas como la inhibición microbiana y la acumulación de sólidos en el biodigestor. Por tanto, bajo lo expuesto anteriormente utilizar una co-digestión de 75%/25% se esperaría que presente mejores resultados para la producción de biogás.

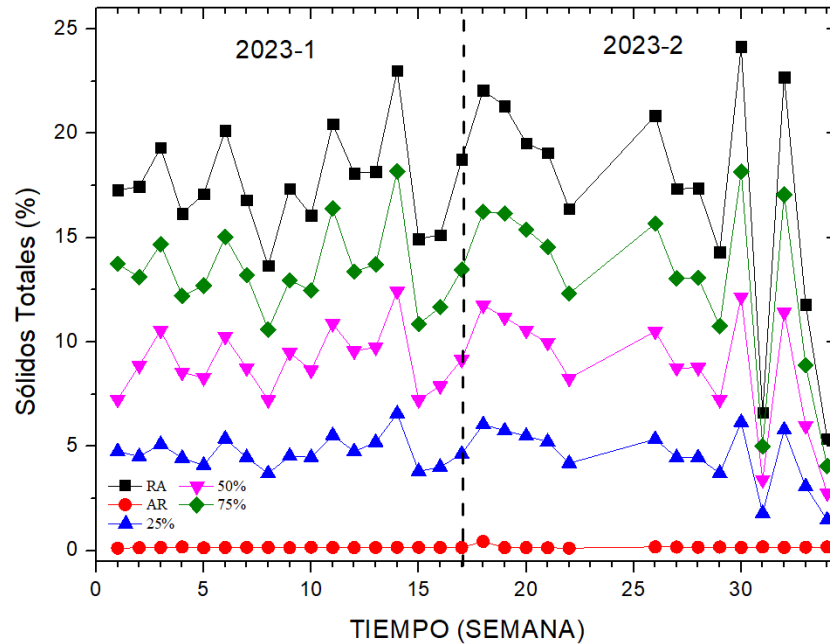


Figura 21: Porcentaje de Sólidos Totales de los RA, AR y sus co-digestiones.

En la figura 22, se observa que las Co-DAs mejoran el %SV de las ARD, sin embargo, no se presenta un cambio significativo entre cada una de las co-digestiones. Un residuo con un rango de 80-90% de sólidos volátiles, indica una alta concentración de materia orgánica biodegradable en la mezcla, lo cual es altamente favorable para la co-digestión anaeróbica. Con base a la figura 23, se puede inferir que, con el rango de %SF mostrado en ambos periodos escolares, se tiene una proporción moderada de materia inorgánica en la mezcla, lo cual es importante para el equilibrio nutricional y la estabilidad del proceso de co-digestión anaeróbica. Aunque los sólidos fijos no son directamente biodegradables, su presencia en la mezcla puede contribuir a proporcionar estructura y soporte para los microorganismos, así como a favorecer la retención de nutrientes esenciales. Sin embargo, un exceso de estos puede resultar en una menor disponibilidad de espacio y nutrientes para los microorganismos, lo que puede afectar negativamente la eficiencia del proceso de co-digestión (Guananga-Diaz & Freytez, n.d.).

Todos los valores de % de SV presentados en la figura 22, se pueden consultar en la tabla B5 del Anexo B de este documento, además en las tablas B4, B7 y B8 el porcentaje de SF, los sólidos totales volátiles expresados en mg/L y los sólidos totales fijos en mg/L, respectivamente.

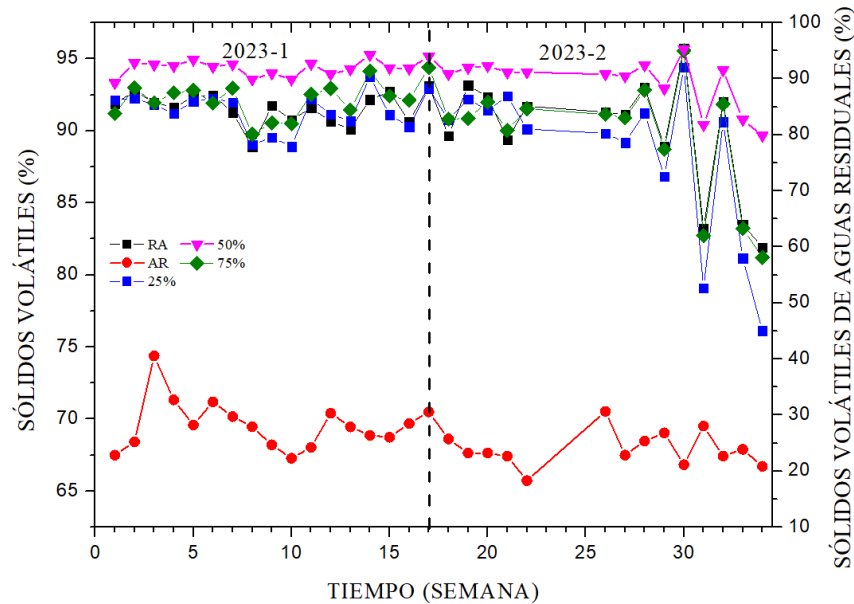


Figura 22: Porcentaje de Sólidos Volátiles de los RA, AR y sus co-digestiones.

En la figura 23, se presenta la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para los RA, ARD y Co-DAs propuestas. Debido al costo de los reactivos de DQO, así como de la disponibilidad de espacio en los refrigeradores del laboratorio, el parámetro de DQO se obtuvo de manera experimental durante todo el semestre 2023-1 y el primer mes (semana 21) del semestre 2023-2; a partir de la semana 21 el parámetro de DQO se obtuvo de manera experimental únicamente para los RA y ARD, y para las co-digestiones se hizo de manera teórica debido a que se presentó una tendencia proporcional respecto los valores de RA y ARD, es decir se tuvo un comportamiento ascendente en el DQO conforme se agrega RA a las AR.

El parámetro de DQO permite conocer la cantidad de materia orgánica e inorgánica que es susceptible a oxidarse químicamente; este parámetro es otra manera de visualizar el potencial que tiene un residuo para ser aprovechado para su conversión en biogás. También este parámetro permite validar, hasta cierto punto los ST presentes en las muestras y/o viceversa; además de utilizarse para el diseño de tecnologías de DA y Co-DA. Se puede observar en la figura 23, que los resultados de DQO para los RA, ARD y Co-DAs, mantienen tendencias similares a las presentadas en los ST, en donde los RA son los que presentan un mayor DQO y las ARD los menores valores de DQO, situación que era de esperarse. Entre mayor es el DQO se espera una mayor generación de biogás, sin embargo, se debe tener precaución, ya que un valor tan alto de DQO también podría indicar una carga orgánica excesiva que podría sobrecargar el biodigestor anaeróbico, afectando su estabilidad y eficiencia. Por lo tanto, es esencial monitorear y controlar cuidadosamente el proceso para garantizar una operación óptima y evitar problemas como la inhibición del sistema y la acumulación de productos tóxicos, asegurando así una producción de biogás correcta. Todos los valores de DQO presentados en la figura 23, se pueden consultar en la tabla B9 del Anexo B de este documento.

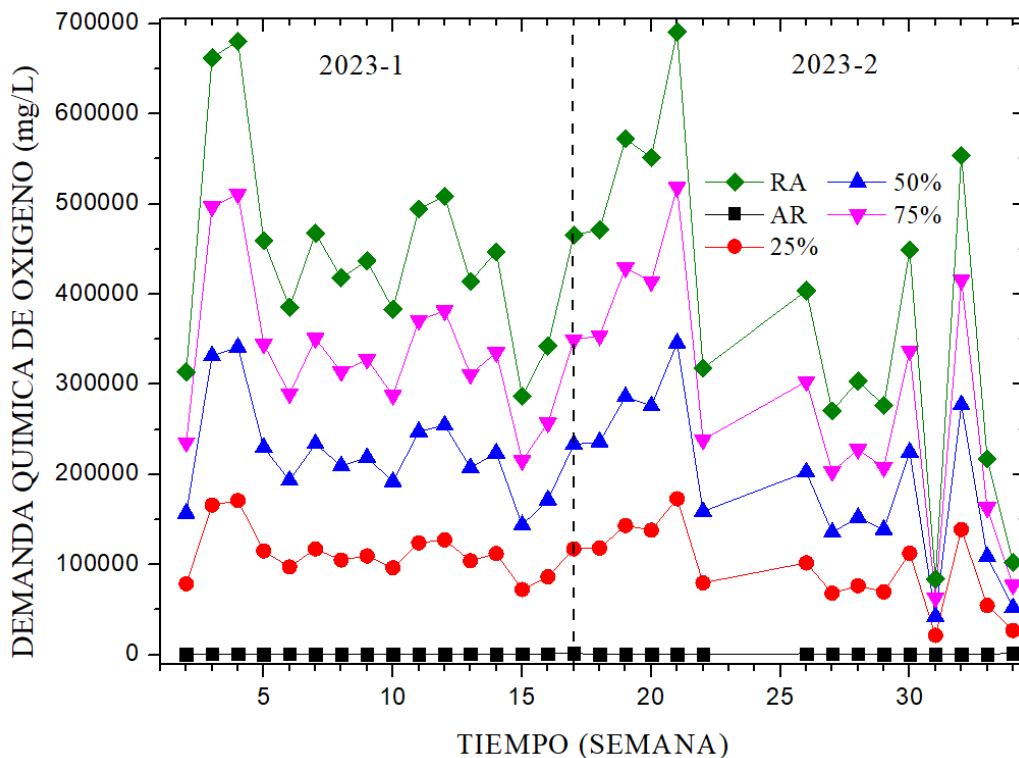


Figura 23: Demanda química de oxígeno de los RA, AR y sus co-digestiones.

En la Tabla 10, se muestra la relación C:N, parámetro que se considerara “favorable” cuando presenta valores entre 20-30. Sin embargo, para este estudio se puede observar que en promedios no se alcanza dicho valor. Esto no indica que no exista producción de biogás, si no que los TRH serán largos, tomando de valor un rango que puede llegar a ser de hasta 15-40 días, en caso de no contar con inóculo (Alvaro et al., 2020) y dependiendo de la tecnología utilizada para el proceso de Co-DA. La relación C:N no fue favorable para las ARD siendo muy baja (cercano a 3), así como para las co-digestiones y los RA, esta relación es muy similar siendo casi 10 para el semestre 2023-1 y 16 en 2023-2. En las tablas B10 y B11 del Anexo B se presentan los valores de C y N, respectivamente.

Tabla 10.- Relación CARBONO: NITRÓGENO (C:N) para los RA, AR y sus co-digestiones.

RELACIÓN C:N													
	2023-1												
SEMANA	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	PROM
AR (1:0)	2.73	4.37	2.90	1.02	4.52	4.27	3.62	2.72	3.65	1.26	0.95	4.76	3.06
25% (1:3)	9.75	3.35	15.34	3.10	6.92	9.07	7.52	9.66	9.88	11.93	21.40	15.10	10.25
50% (1:1)	9.87	3.34	15.90	3.14	6.95	9.15	7.58	9.81	10.01	12.07	21.97	15.26	10.42
75% (3:1)	9.91	3.34	16.10	3.15	6.96	9.17	7.60	9.86	10.06	12.12	22.17	15.31	10.48
RSO (0:1)	9.93	3.33	16.21	3.16	6.96	9.18	7.61	9.88	10.09	12.15	22.27	15.33	10.51
	2023-2												
SEMANA	26	27	28	29	30	31	32	33	34				
AR (1:0)	3.87	3.19	2.43	3.63	2.37	2.49	2.88	3.15	5.63				3.29
25% (1:3)	14.18	16.96	28.40	12.00	12.58	9.41	19.08	16.50	12.87				15.77

50% (1:1)	14.39	17.30	29.36	12.25	12.73	9.92	19.38	16.96	13.36				16.18
75% (3:1)	14.46	17.42	29.70	12.33	12.78	10.10	19.49	17.12	13.53				16.33
RA (0:1)	14.50	17.48	29.88	12.38	12.81	10.20	19.54	17.20	13.63				16.40

Finalmente, el pH de los RA, ARD y Co-DAs propuestos se puede ver en la Tabla 11. El pH ideal para este tipo de procesos es un valor neutro pH= 7. Las ARD presentaron un pH que tiende a 7 en la mayoría de los casos, por lo que se esperaba que las CO-DAs, presenten valores de pH superiores al de los RA y aproximándose al neutro. Sin embargo, la mayoría de los casos esto no ocurre, debiéndose a la presencia de cítricos como cascara de limón (amarillo y/o persa), naranja, tamarindo y toronja presentes en las mezclas. Por otro lado, es importante mencionar que para determinar el pH se utilizó papel indicador, lo cual puede disminuir la precisión pues depende en gran medida de la inspección visual del aplicador. Debido a todo lo mostrado anteriormente, estas ARD no están mejorando las características químicas de los RA, sin embargo, son muy útiles para llevar a cabo la dilución de los RA evitando utilizar agua potable para la preparación de este. Por lo que se puede tratar a ambos residuos por el proceso de Co-DA.

Tabla 11.- pH de los dos ciclos escolares para los RA, AR y sus co-digestiones.

CICLO 2023-1						CICLO 2023-2				
SEMANA	RA	AR	25%	50%	75%	RA	AR	25%	50%	75%
1	5	7	6	5	5	4.5	6	6	5	5
2	4	7	5	4	4	4.5	7	6	5	5
3	4	7	5	4	4	4.5	7	6	5	5
4	4	7	5	5	4	4	6	4	4	4
5	4	7	4	4	4	4.5	7	N/R	N/R	N/R
6	4	7	4	4	4	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
7	4	7	4	4	4	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
8	4	7	4	4	4	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
9	4	8	4	4	4	4	8	N/R	N/R	N/R
10	4	8	4	4	4	4.5	8	N/R	N/R	N/R
11	4	8	5	4	4	5	8	N/R	N/R	N/R
12	4	7	4	4	4	6	8	N/R	N/R	N/R
13	4	7	4	4	4	4.5	8	N/R	N/R	N/R
14	4	6	5	4.5	4.5	5	8	N/R	N/R	N/R
15	4	6	5	4	4	4	8	N/R	N/R	N/R
16	4	6	5	4	4	6	8	N/R	N/R	N/R
17	4	7	4	4	4	4	7	N/R	N/R	N/R
PROM	4	7	5	4	4	4.6	7.4	6	5	5

3.3 Análisis estadístico de los resultados

Con la finalidad de evaluar la representatividad de los resultados del muestreo de RA y ARD de la UABC, Campus Mexicali I, así como de los resultados de los análisis fisicoquímicos, se decidió utilizar el coeficiente de variación o dispersión y el nivel de variabilidad (Vivian Vargas Franco., 2007). Por otra parte, con el intervalo de confianza se determinó la variabilidad que hay entre la media obtenida para cada parámetro; es decir, permite encontrar los valores mínimo y máximo que se puede esperar para cada parámetro físico-químico y de generación de RA; mientras que con la desviación estándar se conoce cuan dispersos son los resultados obtenidos del estudio de caracterización respecto a su media.

El nivel de variabilidad se establece con base a los criterios presentados por (Murray R. Spiegel & Larry J. Stephens., 2009) como se observan en la Tabla 12. Pese a los niveles de variabilidad mostrados en la Tabla 12, el autor sugiere que para valores de Coeficiente de Variación (CV) inferiores a 0.3 se puede decir que el parámetro determinado es representativo y para valores superiores a 0.3 el muestreo no es representativo, por lo aún con un nivel de variabilidad “Moderada” se puede tener un muestreo representativo

Tabla 12.- Nivel de variabilidad en función del coeficiente de variación (Murray R. Spiegel & Larry J. Stephens 2009)

Indicador	Valor obtenido	Nivel de Variabilidad
CV	0 -0.1	Muy baja
CV	0.1-0.25	Baja
CV	0.25-0.4	Moderada
CV	>0.5	Muy Alta

En la Tabla 13 se presentan los indicadores estadísticos para el análisis de generación de RA en el centro comunitario de la UABC. Para la generación de RA, se obtuvo un coeficiente de variación de 0.6238 lo que indica que la variabilidad en la generación de RA es muy alta. Esta variabilidad se debe a que se tiene muy poco control sobre la generación de RA, ya que depende de la dinámica de trabajo de los locatarios; adecuada separación de RA por parte de los locatarios; cambios en el menú, la economía local; afluencia de estudiantes que a su vez depende de eventos meteorológicos, eventos dentro de la UABC como la semana de ingeniería o la feria del libro, de la época de exámenes, entre otros. Con base al análisis estadístico, considerando el valor promedio de generación de RA de 6.47 kg/día mostrado en la Tabla 13 se estima tener una generación de 1.035 ton/año de RA considerando un año escolar

Es importante destacar que en este tipo de estudios los factores antes descritos pueden considerarse como ruido para el muestreo, lo que hace poco común que se presenten resultados con baja variabilidad, a diferencia de cuando se realizan muestreos en procesos automatizados. Todo lo expuesto anteriormente, sugiere que se deben realizar más muestreos con la finalidad de tener más datos que permitan conocer de mejor manera la generación de RA. Por lo anterior, con la cantidad de muestreos y valores encontrados sobre la generación de RA, estadísticamente no se tiene una muestra representativa; sin embargo, estos datos sirven de arranque para poder hacer una estimación del potencial de generación de biogás. Lo anterior se debe a que en este estudio la caracterización se

basa en encontrar la cantidad de RA generada, la composición de los tipos de alimentos que conforman el RA y encontrar los parámetros fisicoquímicos de los RA; y como ya se mencionó anteriormente, no era factible en cuanto a los recursos económicos, de espacio y tiempo; realizar un mayor número de muestreos de RA.

Tabla 13.- Análisis estadístico para la generación de RA del centro comunitario.

Promedio	6.4732
Mediana	5.8220
Desviación estándar	4.0379
Coefficiente de variación	0.6238
Zc	1.96
Intervalo de confianza	1.357289518
Max	7.8305
Min	5.1159

En la tabla 14 y 15, se puede visualizar el análisis estadístico de los parámetros de la caracterización fisicoquímica. Se puede observar que para el análisis de sólidos (tabla 14) se tiene baja o muy baja variabilidad lo que indica que, pese a que la generación de RA es muy variable, sus características en el análisis de sólidos (Densidad, pH, %humedad, %ST, %SV, %SF, ST(mg/L), SF(mg/L), SV(mg/L)) están presentando valores que tienden a ser típicos. Esta información es muy valiosa, ya que es fundamental para la estimación de generación de biogás y para dimensionamiento de tecnologías de DA y Co-DA.

Por otra parte, en la Tabla 15 se observan los parámetros químicos como DQO, C, N y la relación C:N para los RA, ARD y Co-digestiones propuestas. Se observa que se presenta una variabilidad alta y moderada, lo cual se debe a que se realizaron menos análisis, comparado con el estudio de sólidos mostrado en la Tabla 13. Lo anterior se debe a la poca disponibilidad de reactivos que hubo en el mercado durante el semestre 2023-2, así como al presupuesto disponible para la adquisición de reactivos. Además, la manipulación del RA para llevar acabo los estudios de DQO, C y N es compleja debido a que el RA molido tiene una forma viscosa “masilla pegajosa” que dificulta la compactación generando huecos de aire no visibles en los tubos de ensayo de plástico que no era posible visualizar, trayendo por consecuencia un aforado variable para el tamaño de muestra a utilizar en el análisis químico. Pese a lo anterior, los valores promedio para los RA y ARD, se encuentran dentro de los valores reportados en la literatura por diversos autores; por lo que estos datos con sus mezclas, pueden considerarse válidos para el estudio de estimación de biogás y sobre todo para el dimensionamiento de tecnología de DA y Co-DA.

Tabla 14.-Análisis de sólidos para los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Alimentos		Análisis de sólidos						
Parámetros estadísticos	DENSIDAD	HUMEDAD (%)	ST (%)	SF (%)	SV (%)	ST(mg/L)	STV (mg/L)	STF (mg/L)
Promedio	1050.6270	82.2198	17.7802	8.9399	91.0601	180657.6667	165170.1333	15487.5333
Mediana	1049.5973	82.5890	17.4110	8.3407	91.6593	179882.0000	165991.6667	14952.6667
Desviación estándar	11.8848	3.5609	3.5609	2.5189	2.5189	37324.7716	36432.3739	2955.2387
Coefficiente de variación	0.0113	0.0433	0.2003	0.2818	0.0277	0.2066	0.2206	0.1908
Intervalo de confianza IC	4.5137	1.3524	1.3524	0.9566	0.9566	14175.5605	13836.6371	1122.3689
Max	1055.1407	83.5722	19.1326	9.8965	92.0168	194833.2271	179006.7704	16609.9023
Min	1046.1133	80.8674	16.4278	7.9832	90.1035	166482.1062	151333.4962	14365.1644
Nivel Variabilidad	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Moderada	Muy Baja	Baja	Baja	Baja
AGUAS RESIDUALES		Análisis de sólidos						
Parámetros estadísticos	DENSIDAD	HUMEDAD (%)	ST (%)	SF (%)	SV (%)	ST(mg/L)	STV (mg/L)	STF (mg/L)
Promedio	996.5428	99.8355	0.1645	73.5079	26.3692	1528.3333	406.6444	1122.2778
Mediana	997.4400	99.8453	0.1547	74.1229	25.8771	1520.6667	400.6667	1128.3333
Desviación estándar	8.0205	0.0539	0.0539	4.3648	3.9914	149.0614	85.4320	110.8835
Coefficiente de variación	0.0080	0.0005	0.3277	0.0594	0.1514	0.0975	0.2101	0.0988
Intervalo de confianza IC	3.0461	0.0205	0.0205	1.6577	1.5159	56.6120	32.4462	42.1124
Max	999.5889	99.8560	0.1849	75.1656	27.8851	1584.9453	439.0906	1164.3902
Min	993.4967	99.8151	0.1440	71.8501	24.8533	1471.7214	374.1983	1080.1654
Nivel Variabilidad	Muy Baja	Muy Baja	Moderada	Muy Baja	Baja	Muy Baja	Baja	Muy Baja
25% RA / 75% AR		Análisis de sólidos						
Parámetros estadísticos	DENSIDAD	HUMEDAD (%)	ST (%)	SF (%)	SV (%)	ST(mg/L)	STV (mg/L)	STF (mg/L)
Promedio	1007.4401	95.2855	4.7145	9.5845	90.4155	46827.0833	42578.2716	4248.8117
Mediana	1008.8533	95.4130	4.5870	8.8190	91.1810	46368.3333	42697.5833	4131.4667
Desviación estándar	5.5849	0.9814	0.9814	3.2034	3.2034	9329.6508	9233.9065	734.7576
Coefficiente de variación	0.0055	0.0103	0.2082	0.3342	0.0354	0.1992	0.2169	0.1729
Intervalo de confianza IC	2.1211	0.3727	0.3727	1.2166	1.2166	3543.3045	3506.9417	279.0533
Max	1009.5611	95.6582	5.0873	10.8011	91.6322	50370.3878	46085.2133	4527.8650
Min	1005.3190	94.9127	4.3418	8.3678	89.1989	43283.7789	39071.3298	3969.7584
Nivel Variabilidad	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Moderada	Muy Baja	Baja	Baja	Baja
50% RA / 50% AR		Análisis de sólidos						
Parámetros estadísticos	DENSIDAD	HUMEDAD (%)	ST (%)	SF (%)	SV (%)	ST(mg/L)	STV (mg/L)	STF (mg/L)
Promedio	1022.4625	90.8411	9.1589	8.7609	91.1192	89937.3222	82329.2622	7608.0611
Mediana	1022.1075	90.9879	9.0121	8.1382	91.7554	89178.6667	81732.3333	7415.5000
Desviación estándar	7.0476	1.9429	1.9429	2.8206	2.8259	18736.7740	18464.0406	1414.1500
Coefficiente de variación	0.0069	0.0214	0.2121	0.3220	0.0310	0.2083	0.2243	0.1859
Intervalo de confianza IC	2.6766	0.7379	0.7379	1.0712	1.0732	7116.0321	7012.4508	537.0795
Max	1025.1391	91.5790	9.8968	9.8321	92.1924	97053.3543	89341.7130	8145.1406
Min	1019.7858	90.1032	8.4210	7.6897	90.0459	82821.2901	75316.8114	7070.9816
Nivel Variabilidad	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Moderada	Muy Baja	Baja	Baja	Baja
75% RA / 25% AR		Análisis de sólidos						
Parámetros estadísticos	DENSIDAD	HUMEDAD (%)	ST (%)	SF (%)	SV (%)	ST(mg/L)	STV (mg/L)	STF (mg/L)
Promedio	1036.4435	86.5079	13.4921	8.6893	91.3107	134410.2056	123220.8878	11189.3194
Mediana	1035.8620	86.7057	13.2943	8.1212	91.8788	135213.3333	124511.6667	11720.3333
Desviación estándar	8.9170	2.7409	2.7409	2.6680	2.6680	28042.4210	27397.8423	2306.7330
Coefficiente de variación	0.0086	0.0317	0.2031	0.3070	0.0292	0.2086	0.2223	0.2062
Intervalo de confianza IC	3.3866	1.0410	1.0410	1.0133	1.0133	10650.2201	10405.4158	876.0732
Max	1039.8301	87.5489	14.5331	9.7026	92.3239	145060.4257	133626.3036	12065.3927
Min	1033.0569	85.4669	12.4511	7.6761	90.2974	123759.9854	112815.4720	10313.2462
Nivel Variabilidad	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Moderada	Muy Baja	Baja	Baja	Baja

Tabla 15.- Análisis de parámetros químicos de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones

Alimentos		Análisis químico			
Parámetros estadísticos	pH (-)	DQO (mg/L)	Carbono (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	C:N
Promedio	4.3226	425056.8966	63053.7000	5366.9615	13.0336
Mediana	4	436650	56481	5125	12.375
Desviación estándar	0.5560	138833.8902	24519.1470	2323.1423	6.2310
Coefficiente de variación	0.1286	0.3266	0.3889	0.4329	0.4781
Intervalo de confianza IC	0.2112	52727.6690	11773.4238	956.9202	2.9064
Max	4.5337	477784.5656	74827.1238	6323.8818	15.9399
Min	4.1114	372329.2275	51280.2762	4410.0413	10.1272
Nivel Variabilidad	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Alta
AGUAS RESIDUALES		Análisis químico			
Parámetros estadísticos	pH (-)	DQO (mg/L)	Carbono (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	C:N
Promedio	7.1935	774.4828	173.8571	54.6296	3.1612
Mediana	7	750	174	53	3.150943396
Desviación estándar	0.7033	299.5662	66.1886	9.3115	1.2165
Coefficiente de variación	0.0978	0.3868	0.3807	0.1704	0.3848
Intervalo de confianza IC	0.2671	113.7721	39.6588	3.7537	0.5581
Max	7.4607	888.2549	213.5159	58.3833	3.7193
Min	6.9264	660.7106	134.1984	50.8760	2.6031
Nivel Variabilidad	Muy Baja	Moderada	Moderada	Baja	Moderada
25% RA / 75% AR		Análisis químico			
Parámetros estadísticos	pH (-)	DQO (mg/L)	Carbono (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	C:N
Promedio	4.7143	106702.6316	14665.0000	1358.4444	12.6187
Mediana	5	82000	15979.5	1377	12
Desviación estándar	0.7838	73227.0034	6132.3608	720.3808	5.9208
Coefficiente de variación	0.1663	0.6863	0.4182	0.5303	0.4692
Intervalo de confianza IC	0.3036	35161.6042	3674.3785	412.9355	2.8395
Max	5.0179	141864.2358	18339.3785	1771.3799	15.4583
Min	4.4107	71541.0274	10990.6215	945.5089	9.7792
Nivel Variabilidad	Baja	Muy alta	Alta	Muy alta	Alta
50% RA / 50% AR		Análisis químico			
Parámetros estadísticos	pH (-)	DQO (mg/L)	Carbono (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	C:N
Promedio	4.2619	204968.4211	26542.1429	2460.8627	12.8903
Mediana	4	211200	29446.5	2310	12.24632353
Desviación estándar	0.4364	75926.3097	11430.4682	955.6843	6.1234
Coefficiente de variación	0.1024	0.3704	0.4307	0.3884	0.4750
Intervalo de confianza IC	0.1691	36457.7373	6848.8903	506.4900	2.9026

Max	4.4310	241426.1583	33391.0332	2967.3528	15.7929
Min	4.0928	168510.6838	19693.2525	1954.3727	9.9876
Nivel Variabilidad	Baja	Moderada	Alta	Moderada	Alta
75% RA / 25% AR		Análisis químico			
Parámetros estadísticos	pH (-)	DQO (mg/L)	Carbono (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	C:N
Promedio	4.2143	330555.2632	38759.1429	2319.2941	12.9852
Mediana	4	303400	41808	2727	12.33168317
Desviación estándar	0.4053	101220.3824	18246.9946	1802.0499	6.1946
Coeficiente de variación	0.0962	0.3062	0.4708	0.7770	0.4771
Intervalo de confianza IC	0.1570	48603.2592	10933.2061	955.0438	2.9364
Max	4.3713	379158.5223	49692.3490	3274.3379	15.9216
Min	4.0573	281952.0040	27825.9367	1364.2504	10.0488
Nivel Variabilidad	Muy Baja	Moderada	Alta	Muy alta	Alta

Tabla 16.- Resultados de la caracterización fisicoquímica

PARÁMETROS	Residuo de alimentos	Aguas Residuales	25%/75% (RA/AR)	50%/50% (RA/AR)	75%/25% (RA/AR)
DENSIDAD (g/L)	1050.6270	996.5428	1007.4401	1022.4625	1036.4435
HUMEDAD (%)	82.2198	99.8355	99.8355	90.8411	86.5079
ST(%)	17.7802	0.1645	4.7145	9.1589	13.4921
SF (%)	8.9399	73.5079	9.5845	8.7609	8.6893
SV (%)	91.0601	26.3692	90.4155	91.1192	91.3107
ST(g/L)	180.6577	1.5283	46.8271	89.9373	134.4102
STV (g/L)	165.1701	0.4066	42.5783	82.3293	123.2209
STF (g/L)	15.4875	1.1223	4.2488	7.6081	11.1893
pH (-)	4.3226	7.1935	4.7143	4.2619	4.2143
DQO (g/L)	425.0569	0.7745	106.7026	204.9684	330.5553
Carbono (g/L)	63.0537	0.1739	14.6650	26.5421	38.7591
Nitrógeno (g/L)	5.3670	0.0546	1.3584	2.4609	2.3193
C:N	13.0336	3.1612	12.6187	12.8903	12.9852

3.4 Estimación teórica de producción de biogás

El potencial de biogás en un sustrato puede estimarse utilizando la fórmula del potencial de biogás $P_{biogás}$, que calcula la cantidad máxima de biogás que puede producirse a partir de la materia orgánica presente en el sustrato. Esta ecuación (ec. 8) se basa en la Carga diaria de Materia Orgánica Volátil del Residuo ($CMOVR$), además como se mencionó en el capítulo anterior, el modelo matemático depende de la tecnología y se debe tener presente. Por lo que, el término $f_{biogás}$ hace alusión al Factor de biogás y es determinado a partir de los resultados experimentales sobre residuos similares; con lo que va intrínseca la tecnología del biodigestor. Es decir, para un mismo residuo se tendrán valores distintos de $f_{biogás}$ dependiendo de la tecnología. Para los RA se determinó utilizar un valor de $0.37 \text{ m}^3\text{-biogás/día}$, ya que fue obtenido de un estudio experimental con residuos de alimentos de cafetería realizado por (Curry y Pillay, 2012). Para las ARD se utilizó un factor de $0.074689 \text{ m}^3/\text{kg}$, tomado de un estudio experimental sobre co-digestión de aguas residuales domésticas (Du et al., 2019).

$$P_{biogás} = CMOVR \times f_{biogás} \text{ (ec 8)}$$

También para el cálculo potencial de potencial de metano y el potencial energético tenemos:

$$PCH_4 = P_{biogás} \times f_{Cmetano} \text{ (ec 9)}$$

- PCH_4 =Potencial de metano
- $P_{biogás}$ = Potencial de biogás
- $f_{Cmetano}$ = Factor de metano

$$P_{ener} = P_{biogás} \times EP \text{ (ec 10)}$$

- P_{ener} =Potencial de energía

- EP =Equivalente producción de energía eléctrica

Mientras que para el cálculo de co-digestiones se empleó la ecuación 1, obtenida de Xinrui Du., et al (2019) mostrada a continuación:

$$PBCoDA = (FbiogásAli \times MAli + FbiogásARD \times MARD)/(MAli + MARD) \text{ (ec 11)}$$

- PBCoDA=Potencial de biogás de co-digestiones
- FbiogásAli=Factor de biogás de Alimentos
- FbiogásARD=Factor de biogás de Aguas residuales domesticas
- MAli=Masa de residuos de alimentos
- MARD=Masa de aguas residuales

De los análisis fisicoquímicos realizados con base a la NMX-AA-034-SCFI-2015 y su respectivo calcula señalado en esta misma. Se obtuvieron de manera experimental de la semana 1 a la 21 de todas las muestras, a partir de la semana 22 a la semana 33 se analizaron de manera experimental únicamente RA y AR por individual y sus respectivas co-digestiones fueron calculadas de manera teórica.

Para las estimaciones de potencial de biogás, metano y energético se mostrarán dos casos de estudio, donde el Caso 1 corresponde a NO utilizar el RA recolectado en su totalidad si no, fijar el total recolectado como máxima capacidad y preparar las Co-DAs con base a eso, mientras que el Caso 2 corresponderá a utilizar TODO el RA recolectado y con base a ese total agregar agua residual para tener la proporción de las Co-DAs. Por otra parte, para estimar el potencial de biogás de las ARD se utilizó una cantidad de masa igual a la recolectada en cada día de muestreo para los RA, con la finalidad poder realizar una comparación entre ambas digestiones anaeróbicas.

En la figura 24 y 25 se presenta la generación de biogás a partir de los RA, ARD y Co-DAs de la UABC Campus Mexicali 1, para el caso 1 y 2, respectivamente. Mientras que en el Anexo C se pueden tener los valores tabulados para estas figuras además de la equivalencia de masa y volúmenes a utilizar en los porcentajes de cada Co-DA. Para el caso 1 de estudio (figura 24), se puede observar que la generación de biogás mantiene las tendencias mostradas en los estudios de caracterización; es decir, la mayor generación de biogás se tiene para el RA y conforme disminuye su proporción en las Co-DAs su potencial de biogás disminuye de manera proporcional. Lo anterior era de esperarse pues se tiene una masa de mezcla igual para los diferentes residuos. Para el caso 1 de estudio se tiene un potencial de biogás promedio de 2.3 m³/día, en donde la máxima generación de biogás se tiene para la DA de RA.

Como se comentó en los capítulos anteriores, el biogás es un biocombustible en estado gaseoso conformado de Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂) y trazas de otros gases. Sin embargo, el contenido de metano el cual ronda en un 60-70%, es la fracción del biogás que permite la generación de energía eléctrica y/o térmica. Con base al potencial de biogás mostrado en las figuras 24 y 25, y tomando un 65% (0.65) de contenido de metano obtenemos la fracción de metano, mostrado en la figura 26 y 27, mientras que el contenido de energía se muestra en la figura 28 y 29 y su tabulación de mostrada en el Anexo C.

El comportamiento para el potencial de generación de metano y para el potencial de generación de energía eléctrica, se observa en las figuras 26 y 28 respectivamente; y presenta la misma tendencia que las presentadas para el potencial de biogás. Lo anterior se debe a que se está considerando que el biogás tendrá un rendimiento de 65 % para todos los casos, así como el factor de equivalencia de

producción de energía eléctrica. Los valores promedios de generación de biogás, metano y potencial eléctrico para el caso 1 se presentan en el Anexo C y se puede observar que se tiene un potencial de metano de 1.5 m³/día y un potencial eléctrico de 47.56 kWh/día.

Por otra parte, se puede observar en la figura 25 (caso 2), que para las Co-DAs se obtiene tendencia diferente que los resultados mostrados para el caso 1. Se observa que las proporciones de 25% y 75% están invertidas, además de que la proporción de 50% rebasan la producción de biogás de los RA. Esto es debido a que la masa de agua aumenta conforme el RA es menor, debido a que se trabaja con el total de RA recolectado por día, lo que hace que la cantidad de agua dependa del total de RA para preparar la proporción, lo que resulta en menor cantidad conforme el RA aumenta ya que este requiere menos agua. Aplicándolo en el caso de la universidad, se puede intercalar las Co-DAs, según sea el caso que se prefiera gestionar para este proceso, ya que la capacidad de la PTAR de la UABC cuenta con una capacidad de 864 m³/día, los cuales son superiores a cualquier Co-DA de las mostradas en este estudio. La generación de metano y potencial eléctrico respetan las tendencias de generación de biogás, por las mismas razones del caso 1. Los valores promedios de generación de biogás, metano y potencial eléctrico para el caso 2 se presentan en el Anexo C y se puede observar que se tiene un potencial de biogás, de metano y eléctrico de 5.73 m³/día, 3.73 m³/día y 118.46 kWh/día, respectivamente para una proporción de 25% RA y 75% ARD.

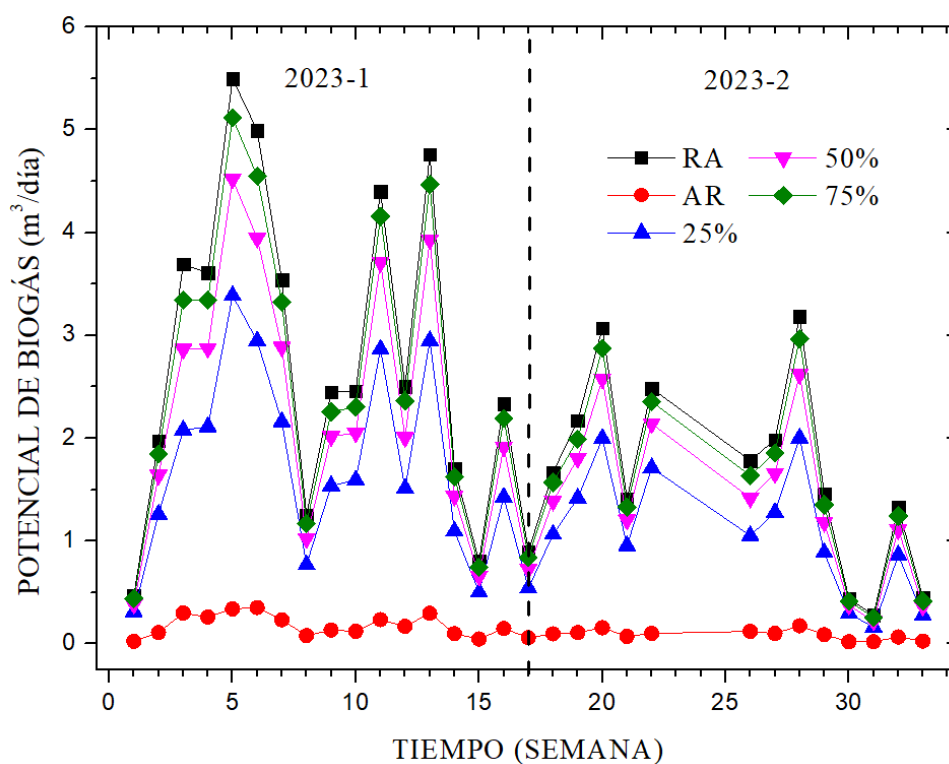


Figura 24: Cálculo de Potencial de biogás a partir de los RA, ARD y Co-Das, Caso 1.

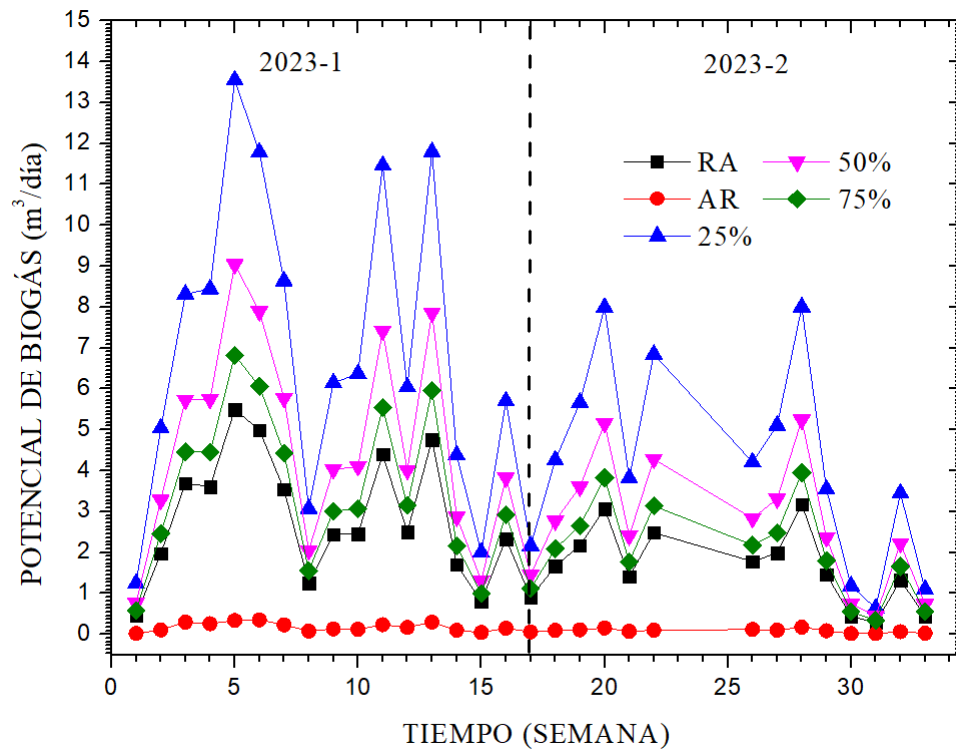


Figura 25: Cálculo del Potencial de biogás a partir de los RA, ARD y Co-DAs, Caso 2.

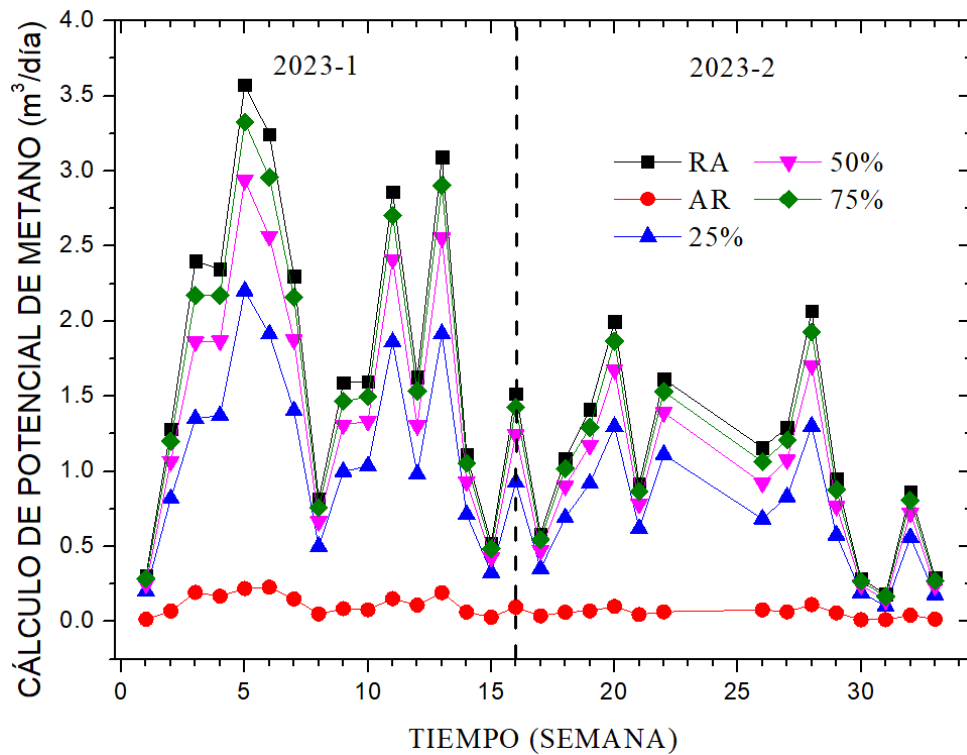


Figura 26: Cálculo de potencial de metano, Caso 1.

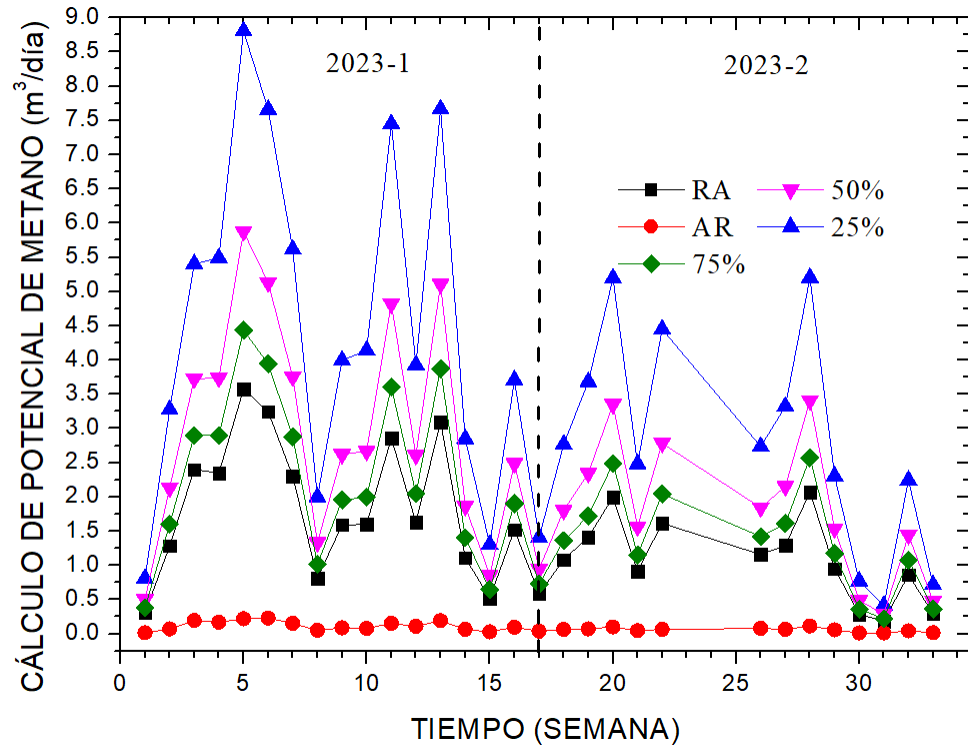


Figura 27: Cálculo de potencial de metano, Caso 2.

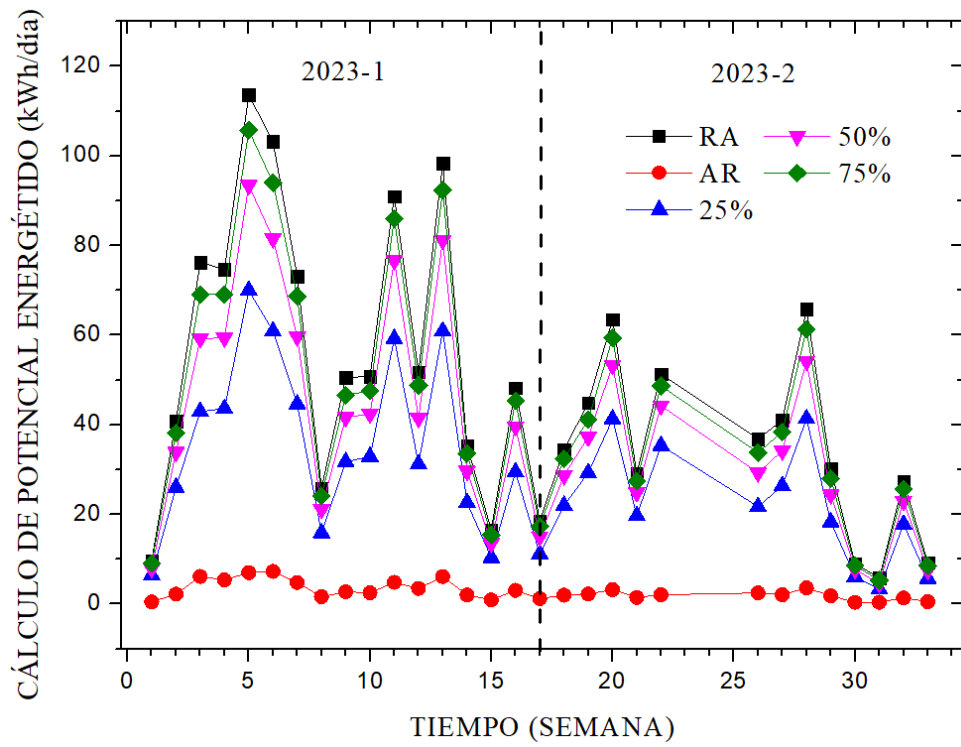


Figura 28: Cálculo de potencial energético, Caso 1.

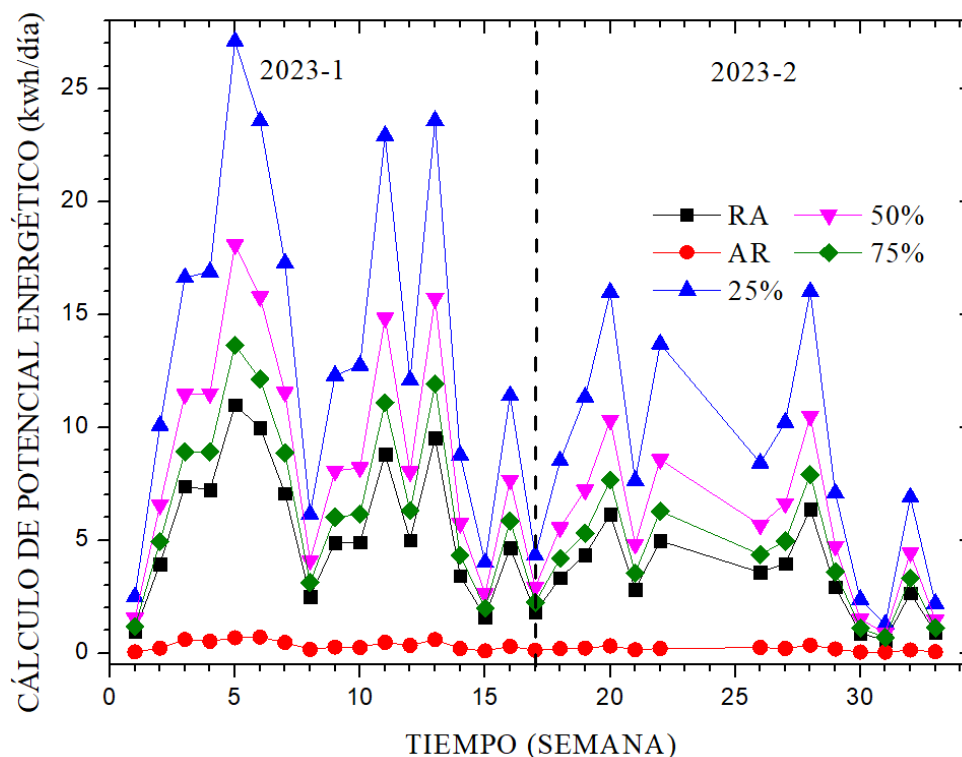


Figura 29: Cálculo de potencial energético, Caso 2.

En la tabla 16 se presenta el potencial anual de generación de biogás, metano y eléctrico para los casos 1 y 2. Se puede observar que al utilizar todo el RA generado diariamente (caso 2) se puede tener una generación anual de biogás de 871.71 m³/año de biogás el cual es 2.5 veces superior a sólo utilizar los RA para generación de biogás. Por lo anterior la Co-DA entre los RA y ARD se visualiza como una alternativa viable para dar tratamiento sustentable a este tipo de residuos.

Tabla 167.- Cálculo anual de potencial de biogás, metan y energético.

Generación anual de RA	1035.72									
	CASO 1					CASO 2				
	RA	AR	25%	50%	75%	RA	AR	25%	50%	75%
Potencial de biogás	317.23	18.54	198.11	260.54	295.75	307.90	17.99	769.1518	505.7650616	382.7426
Potencial de metano	206.20	12.05	128.77	169.35	192.24	200.13	11.69	499.94	328.74729	248.78
Potencial energético	6555.85	383.22	4094.19	5384.37	6112.01	6363.03	371.95	15895.09	10452.01	7909.66

Con este estudio se generó la información base, para poder estimar de manera experimental el potencial de biogás, encontrar de manera más eficiente la proporción óptima para la máxima generación de biogás; ya que los estudios experimentales comenzarán desde una proporción de 25% RA y 75% ARD, con lo que se reduce el tiempo de experimentación, así como el costo económico asociado. Por otro lado, la caracterización fisicoquímica generada en este estudio permite tener información que, en conjunto con los resultados experimentales, puedan llevar al diseño de la mejor tecnología para dar tratamiento es estos residuos.

3.5 Conclusiones y recomendaciones

Después de haber realizado el estudio de estimación teórica del potencial de biogás por co-digestión anaeróbica de los RSO y aguas residuales domésticas de la UABC, campus Mexicali I; se concluye que la Co-DA de estos residuos presenta una mayor generación de biogás respecto a la DA de los RA y ARD, lo que sustenta que es factible el aprovechamiento energético de estos residuos por medio del proceso de Co-DA. A continuación, se presentan las principales conclusiones:

- Debido a la dinámica de días de trabajo que se tienen en una universidad, provocada por días inhábiles y suspensiones por eventos climatológicos, los métodos sistemático y aleatorio simple son adecuados para el muestreo de RA y ARD, respectivamente.
- La metodología de muestreo de RA planteada en este estudio se puede aplicar a restaurantes y cafeterías universitarias.
- La Co-DA compuesta de 25% ARD con 75% RA (1:3) presenta la mayor generación de biogás siendo de 5.73 m³/día equivalente a 871.71 m³/año de biogás. Ya que dichas proporciones manejan la mayor cantidad de volumen de sustrato lo que equivale a un potencial de metano 3.73 m³/día y 567 m³ anual y un potencial eléctrico de 118.46 m³/día equivalente a 18015 m³/año.
- Se encontró que la relación de 25%/75%, presentó una densidad de 1,007.44 g/L, un porcentaje de humedad, de ST, SV y SF de 99.84%, 4.71%, 90.42% y 9.58%, respectivamente; un pH de 4.71, una DQO de 106,702.63 mg/L y una relación de C/N promedio de 12.62.
- Las ARD no mejoraron las características fisicoquímicas de los RA en ninguna de las CO-DAs analizadas, por lo que pueden ser utilizadas para la preparación del sustrato, evitando el uso de agua potable para el funcionamiento del proceso, además de tratar simultáneamente ambos residuos.
- Se encontró que en el centro comunitario de la UABC campus Mexicali 1, se tiene una generación anual de 1.03 ton de RA y 6.47 kg/día de RA. En donde los principales alimentos que componen a los RA son; tubérculos como la papa, frutas tales como cascara de naranja y verduras como la lechuga.
- La Co-DA de RA y ARD es una alternativa prometedora en comparación con el tratamiento de ARD por medio de procesos aeróbicos, ya que con este último tratamiento sólo se obtiene agua tratada; sin embargo, con la Co-DA se tiene la generación de biogás y una menor generación de lodos que pueden disponerse sin afectaciones ambientales.

Este estudio muestra que la implementación de sistemas de co-digestión anaeróbica puede contribuir de manera significativa a la generación de energía renovable en el campus universitario. La capacidad de aprovechar residuos orgánicos, como los residuos de alimentos y las aguas residuales, para la producción de biogás, no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también ofrece una solución ambientalmente sostenible para la gestión de residuos.

Derivado de este estudio se plantean las siguientes recomendaciones:

- Es fundamental llevar a cabo la validación experimental de los resultados mostrados en este estudio. Sin embargo, estos ayudan a realizar la experimentación en un menor tiempo además de ahorros económicos.
- Los resultados de este estudio permiten tener la información base para el diseño de la tecnología de Co-DA que permita dar el tratamiento a los RA y ARD de la UABC campus Mexicali.

- Se recomienda aprovechar los RA de los restaurantes aledaños a la UABC para maximizar el potencial de biogás y tratar una mayor cantidad de RA. Lo anterior implica que se debe llevar a cabo un proyecto social y de gestión de RA.
- Para reducir la incertidumbre en cuanto a la generación de RA, se recomienda seguir realizando la caracterización de los RA en cuanto a la cantidad y tipo de alimentos. Esto mismo aplica para los parámetros físico-químicos especialmente de DQO, Carbono y Nitrógeno, por presentar mayor variabilidad.

REFERENCIAS

- Abunde Neba, F., Asiedu, N. Y., Morken, J., Addo, A., & Seidu, R. (2020). A novel simulation model, BK_BiogaSim for design of onsite anaerobic digesters using two-stage biochemical kinetics: Codigestion of blackwater and organic waste. *Scientific African*, 7, e00233. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2019.E00233>
- Ajay, C. M., Mohan, S., & Dinesha, P. (2021). Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review. In *Waste Management* (Vol. 125, pp. 10–26). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.031>
- Arelli, V., Begum, S., Anupaju, G. R., Kuruti, K., & Shailaja, S. (2018). Dry anaerobic co- digestion of food waste and cattle manure: Impact of total solids, substrate ratio and thermal pre treatment on methane yield and quality of biomanure. *Bioresource Technology*, 253, 273– 280. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.01.050>
- Assessment of sampling and chemical analysis of source-separated organic household waste. *Waste Management*, 24(6), 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.02.013>
- Baral, K. R., Labouriau, R., Olesen, J. E., & Petersen, S. O. (2017). Nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency of manure and digestates applied to spring barley. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 188–198. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.01.012>
- Buendía, I. M., Fernández, F. J., Villaseñor, J., & Rodríguez, L. (2008). Biodegradability of meat industry wastes under anaerobic and aerobic conditions. *Water Research*, 42(14), 3767–3774. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.06.027>
- Chiu, S. F., Chiu, J. Y., & Kuo, W. C. (2013). Biological stoichiometric analysis of nutrition and ammonia toxicity in thermophilic anaerobic co-digestion of organic substrates under different organic loading rates. *Renewable Energy*, 57, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.054>
- Cohen, B. (2017). Modelling approaches for greenhouse gas emissions projections from the waste sector. *Sustainable Production and Consumption*, 10, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.12.002>
- Dharmendra. (2022). Organic waste: generation, composition and valorisation. *Advanced Organic Waste Management: Sustainable Practices and Approaches*, 3–15. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00024-1>
- Ejimofo, M. I., Ezemagu, I. G., & Menkiti, M. C. (2020). Biogas production using coagulation sludge obtained from paint wastewater decontamination: Characterization and anaerobic digestion kinetics". *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100024>
- Garfi, M., Ferrer-Martí, L., Perez, I., Flotats, X., & Ferrer, I. (2011). Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*, 37(12), 2066–2070. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018>
- Ghimire, A., Kumar, G., Sivagurunathan, P., Shobana, S., Saratale, G. D., Kim, H. W., Luongo, V., Esposito, G., & Munoz, R. (2017). Bio-hythane production from microalgae biomass: Key challenges

and potential opportunities for algal bio-refineries. *Bioresource Technology*, 241, 525–536. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.156>

Hansen, T. L., Schmidt, J. E., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J. L. C., Mosbæk, H., & Christensen, J. L. C., Spliid H., Hansen T.L., Svärd A., & Christensen T.H. (2004). Assessment of sampling and chemical analysis of source-separated organic household waste. Submitted to Waste Management.

Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A., & Luczkiewicz, A. (2021). Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 150). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>

La Cour Jansen, J., Spliid, H., Hansen, T. L., Svärd, Å., & Christensen, T. H. (2004).

Lawal-Akinlami, H. A., & Shanmugam, P. (2017). Comparison of biochemical methane potential and methanogen morphology of different organic solid wastes co-digested anaerobically with treatment plant sludge. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 216–226. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2017.02.001>

Leitão, A., Moni, D., & Maria, C. (2022). Anaerobic co-digestion of food waste with sewage sludge from wastewater treatment plant of Sequele, Luanda-Angola. *Environmental Challenges*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100635>

Li, W., Loh, K. C., Zhang, J., Tong, Y. W., & Dai, Y. (2018). Two-stage anaerobic digestion of food waste and horticultural waste in high-solid system. *Applied Energy*, 209, 400–408. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.05.042>

Lin, J., Zuo, J., Ji, R., Chen, X., Liu, F., Wang, K., & Yang, Y. (2012). Methanogenic community dynamics in anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste and food waste. *Journal of Environmental Sciences*, 24(7), 1288–1294. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60927-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60927-3)

Long, H., Li, X., Wang, H., & Jia, J. (2013). Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, pp. 344–352). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.035>

Longo, S., Cellura, M., Guarino, F., & Mistretta, M. (2020). A life cycle assessment of tri-generation from biomass waste: The experience of the “agro-combined” of Thibar. *Biofuels for a More Sustainable Future: Life Cycle Sustainability Assessment and Multi-Criteria Decision Making*, 213–226. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815581-3.00007-5>

Nawaz, A., & Razzak, S. A. (2024). Co-pyrolysis of biomass and different plastic waste to reduce hazardous waste and subsequent production of energy products: A review on advancement, synergies, and future prospects. *Renewable Energy*, 224, 120103. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120103>

Ludlow, J., Jalil-Vega, F., Schmidt Rivera, X., Garrido, R. A., Hawkes, A., Staffell, I., & Balcombe, P. (2021). Organic waste to energy: Resource potential and barriers to uptake in Chile. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 1522–1537. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.08.0>

- Maghanaki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G., & Galogah, R. J. (2013). Potential of biogas production in Iran. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 28, pp. 702– 714). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.021>
- Marín, D., Méndez, L., Suero, I., Díaz, I., Blanco, S., Fdz-Polanco, M., & Muñoz, R. (2022). Anaerobic digestion of food waste coupled with biogas upgrading in an outdoors algal-bacterial photobioreactor at pilot scale. *Fuel*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124554>
- Mu, L., Zhang, L., Zhu, K., Ma, J., Ifran, M., & Li, A. (2020). Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production. *Science of the Total Environment*, 704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135429>
- Mudzanani, K., Iyuke, S. E., & Daramola, M. O. (2022). Co-digestion of wastewater treatment sewage sludge with various biowastes: A comparative study for the enhancement of biogas production. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2172–2183. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.539>
- NORMA MEXICANA NMX-AA-15-1985. PROTECCIÓN AL AMBIENTE - CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES - MUESTREO - MÉTODO DE CUARTEO
- NORMA MEXICANA NMX-AA-61-1985, PROTECCION AL AMBIENTE-CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES-DETERMINACION DE LA GENERACION
- Rajagopal, R., & Béline, F. (2011). Anaerobic hydrolysis and acidification of organic substrates: Determination of anaerobic hydrolytic potential. *Bioresource Technology*, 102(10), 5653–5658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.068>
- Ramírez Lara, E., De la Rosa, J. R., Ramírez Castillo, A. I., Cerino-Córdova, F. de J., López Chuken, U. J., Fernández Delgadillo, S. S., & Rivas-García, P. (2017). A comprehensive hazardous waste management program in a Chemistry School at a Mexican university. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1486–1491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.158>
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed., [versión 23.6 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [14/09/2023].
- Saha, S., Hussain, A., Lee, J., Lee, E., & Lee, H.-S. (2023). An integrated leachate bed reactor – anaerobic membrane bioreactor system (LBR-AnMBR) for food waste stabilization and biogas recovery. *Chemosphere*, 311, 137054. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137054>
- Satayavibul, A., & Ratanatamskul, C. (2021). A novel integrated single-stage anaerobic co- digestion and oxidation ditch-membrane bioreactor system for food waste management and building wastewater recycling. *Journal of Environmental Management*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111624>
- T. H. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management*, 24(4), 393–400. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2003.09.009>
- Thakur, H., Dhar, A., & Powar, S. (2022). Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in continuously stirred tank reactor. *Results in Engineering*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100617>

- Tong, H., Tong, Y. W., & Peng, Y. H. (2019). A comparative life cycle assessment on mono- and co-digestion of food waste and sewage sludge. *Energy Procedia*, 158, 4166–4171. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.81>
- Van Ewijk, S., & Stegeman, J. A. (2020). Recognising waste use potential to achieve a circular economy. *Waste Management*, 105, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.019>
- Velusamy, S., Subbaiyyan, A., Ramasamy, K., Shanmugamoorthi, M., Vellingiri, V., Chandrasekaran, Y., & Murugesan, V. (2022). Use of Municipal solid waste inert as a powerful replacement of fine aggregate in mortar cube. *Materials Today: Proceedings*, 65, 549–553. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.094>
- Wang, M., Li, W., Li, P., Yan, S., & Zhang, Y. (2017). An alternative parameter to characterize biogas materials: Available carbon-nitrogen ratio. *Waste Management*, 62, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.025>
- Ware, A., & Power, N. (2016). Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. *Renewable Energy*, 97, 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.068>
- Wickham, R., Galway, B., Bustamante, H., & Nghiem, L. D. (2016). Biomethane potential evaluation of co-digestion of sewage sludge and organic wastes. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 113, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.018>
- Zhu, B., Zhang, R., Gikas, P., Rapport, J., Jenkins, B., & Li, X. (2010). Biogas production from municipal solid wastes using an integrated rotary drum and anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource Technology*, 101(16), 6374–6380. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.075>
- Fernández, C., Martínez, E. J., Morán, A. y Gómez, X. (2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogas e hidrógeno. *Revista ION*, 29, 47-62. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>
- Curry N., Pillay P., 2012. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy*.41. pp. 200-209.
- Alvaro, Xavier, Palacios, & Ocaña. (2020). *EVALUACIÓN DE UN EFLUENTE LÍQUIDO OBTENIDO MEDIANTE BIODIGESTORES CON DIFERENTES TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS.
- Buendía, I. M., Fernández, F. J., Villaseñor, J., & Rodríguez, L. (2008). Biodegradability of meat industry wastes under anaerobic and aerobic conditions. *Water Research*, 42(14), 3767–3774. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.06.027>
- Chiu, S. F., Chiu, J. Y., & Kuo, W. C. (2013). Biological stoichiometric analysis of nutrition and ammonia toxicity in thermophilic anaerobic co-digestion of organic substrates under different organic loading rates. *Renewable Energy*, 57, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.054>
- Cohen, B. (2017). Modelling approaches for greenhouse gas emissions projections from the waste sector. *Sustainable Production and Consumption*, 10, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.12.002>

- Durán, F., Zamorano-López, N., Barat, R., Ferrer, J., & Aguado, D. (2018). Understanding the performance of an AnMBR treating urban wastewater and food waste via model simulation and characterization of the microbial population dynamics. *Process Biochemistry*, 67, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.02.010>
- Ejimofofor, M. I., Ezemagu, I. G., & Menkiti, M. C. (2020). Biogas production using coagulation sludge obtained from paint wastewater decontamination: Characterization and anaerobic digestion kinetics". *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100024>
- Guananga-Díaz, N. I., & Freytez, E. (n.d.). *PROCESOS BIOLÓGICOS APLICADOS A LAS AGUAS RESIDUALES s Grupo de capacitación e investigación pedagógica*. <https://www.researchgate.net/publication/378770111>
- Haslinger, J., Krampe, J., & Lindtner, S. (2016). Operating costs and energy demand of wastewater treatment plants in Austria: Benchmarking results of the last 10 years. *Water Science and Technology*, 74(11), 2620–2626. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.390>
- Kim, S., Bae, J., Choi, O., Ju, D., Lee, J., Sung, H., Park, S., Sang, B. I., & Um, Y. (2014). A pilot scale two-stage anaerobic digester treating food waste leachate (FWL): Performance and microbial structure analysis using pyrosequencing. *Process Biochemistry*, 49(2), 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.10.022>
- Kimura, K., Honoki, D., & Sato, T. (2017). Effective physical cleaning and adequate membrane flux for direct membrane filtration (DMF) of municipal wastewater: Up-concentration of organic matter for efficient energy recovery. *Separation and Purification Technology*, 181, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.005>
- La Cour Jansen, J., Spliid, H., Hansen, T. L., Svärd, Å., & Christensen, T. H. (2004). Assessment of sampling and chemical analysis of source-separated organic household waste. *Waste Management*, 24(6), 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.02.013>
- Leitão, A., Moni, D., & Maria, C. (2022). Anaerobic co-digestion of food waste with sewage sludge from wastewater treatment plant of Sequele, Luanda-Angola. *Environmental Challenges*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100635>
- Marín, D., Méndez, L., Suero, I., Díaz, I., Blanco, S., Fdz-Polanco, M., & Muñoz, R. (2022). Anaerobic digestion of food waste coupled with biogas upgrading in an outdoors algal-bacterial photobioreactor at pilot scale. *Fuel*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124554>
- Moñino, P., Aguado, D., Barat, R., Jiménez, E., Giménez, J. B., Seco, A., & Ferrer, J. (2017). A new strategy to maximize organic matter valorization in municipalities: Combination of urban wastewater with kitchen food waste and its treatment with AnMBR technology. *Waste Management*, 62, 274–289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.006>
- Mu, L., Zhang, L., Zhu, K., Ma, J., Ifran, M., & Li, A. (2020). Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production. *Science of the Total Environment*, 704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135429>
- Nawaz, A., & Razzak, S. A. (2024). Co-pyrolysis of biomass and different plastic waste to reduce hazardous waste and subsequent production of energy products: A review on advancement,

- synergies, and future prospects. *Renewable Energy*, 224, 120103.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120103>
- Pons, M.-N., Pons, M. N., Spanjers, H., Baetens, D., Nowak, O., Gillot, S., Nouwen, J., & Schuttinga, N. (2004). *European Water Management Online*.
<https://www.researchgate.net/publication/237790819>
- Pretel, R., Moñino, P., Robles, A., Ruano, M. V., Seco, A., & Ferrer, J. (2016). Economic and environmental sustainability of an AnMBR treating urban wastewater and organic fraction of municipal solid waste. *Journal of Environmental Management*, 179, 83–92.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.057>
- Rajagopal, R., & Béline, F. (2011). Anaerobic hydrolysis and acidification of organic substrates: Determination of anaerobic hydrolytic potential. *Bioresource Technology*, 102(10), 5653–5658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.068>
- Ramírez Lara, E., De la Rosa, J. R., Ramírez Castillo, A. I., Cerino-Córdova, F. de J., López Chukén, U. J., Fernández Delgadillo, S. S., & Rivas-García, P. (2017). A comprehensive hazardous waste management program in a Chemistry School at a Mexican university. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1486–1491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.158>
- Saha, S., Hussain, A., Lee, J., Lee, E., & Lee, H.-S. (2023). An integrated leachate bed reactor – anaerobic membrane bioreactor system (LBR-AnMBR) for food waste stabilization and biogas recovery. *Chemosphere*, 311, 137054.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137054>
- Satayavibul, A., & Ratanatamskul, C. (2021). A novel integrated single-stage anaerobic co-digestion and oxidation ditch-membrane bioreactor system for food waste management and building wastewater recycling. *Journal of Environmental Management*, 279.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111624>
- Serralta, J., Ribes, J., Seco, A., & Ferrer, J. (2002). *A supervisory control system for optimising nitrogen removal and aeration energy consumption in wastewater treatment plants*.
<https://iwaponline.com/wst/article-pdf/45/4-5/309/425411/309.pdf>
- Silva-Teira, A., Vázquez-Padín, J. R., Weiler, R., Fernández-González, R., Rogalla, F., & Garrido, J. M. (2018). Performance of a hybrid membrane bioreactor treating a low strength and alkalinity wastewater. *Process Biochemistry*, 66, 176–182.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.12.015>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & David Stensel, H. (n.d.). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse (Fourth Edition)*.
- Thakur, H., Dhar, A., & Powar, S. (2022). Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in continuously stirred tank reactor. *Results in Engineering*, 16.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100617>
- Tong, H., Tong, Y. W., & Peng, Y. H. (2019). A comparative life cycle assessment on mono- and co-digestion of food waste and sewage sludge. *Energy Procedia*, 158, 4166–4171.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.814>

- van Ewijk, S., & Stegemann, J. A. (2020). Recognising waste use potential to achieve a circular economy. *Waste Management*, 105, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.019>
- Velusamy, S., Subbaiyyan, A., Ramasamy, K., Shanmugamoorthi, M., Vellingiri, V., Chandrasekaran, Y., & Murugesan, V. (2022). Use of Municipal solid waste inert as a powerful replacement of fine aggregate in mortar cube. *Materials Today: Proceedings*, 65, 549–553. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.094>
- Wang, M., Li, W., Li, P., Yan, S., & Zhang, Y. (2017). An alternative parameter to characterize biogas materials: Available carbon-nitrogen ratio. *Waste Management*, 62, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.025>
- Ware, A., & Power, N. (2016). Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. *Renewable Energy*, 97, 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.068>
- Wickham, R., Galway, B., Bustamante, H., & Nghiem, L. D. (2016). Biomethane potential evaluation of co-digestion of sewage sludge and organic wastes. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 113, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.018>
- Zhu, B., Zhang, R., Gikas, P., Rapport, J., Jenkins, B., & Li, X. (2010). Biogas production from municipal solid wastes using an integrated rotary drum and anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource Technology*, 101(16), 6374–6380. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.075>
- Noemí Hernández-Neri, Julio Armando de Lira-Flores, Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo, Juan Fernando García-Trejo, Claudia Gutiérrez-Antonio. (2022) Chapter 5 - Opportunities in the intensification of the production of biofuels for the generation of electrical and thermal energy. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824117-2.00012-0>.
- Murray R. Spiegel & Larry J. Stephens (2009). Estadística. 4ta Edición, Ed.McGraw-Hill/Interamericana, México. ISBN: 9789701068878.
- Vivian Vargas Franco (2007). Estadística descriptiva para Ingeniería ambiental con SPSS. 21 Edición. Colombia. ISBN 978-958-33-9319-3.
- Alvaro, Xavier, Palacios, & Ocaña. (2020). *EVALUACIÓN DE UN EFLUENTE LÍQUIDO OBTENIDO MEDIANTE BIODIGESTORES CON DIFERENTES TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS.
- Angula, S., Mofokeng, T., Basitere, M., & Ikumi, D. (2022). *Potential Co-Disposal of Food Waste and Sewage Sludge in South Africa: A Review*. <https://doi.org/10.20944/preprints202208.0530.v1>
- Casal, J., & Mateu, E. (2003). TIPOS DE MUESTREO. In *Rev. Epidem. Med. Prev* (Vol. 1).
- Chan, P. C., de Toledo, R. A., Lu, H. I., & Shim, H. (2019). Effect of Zinc Supplementation on Biogas Production and Short/Long Chain Fatty Acids Accumulation During Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Domestic Wastewater. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3885–3895. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0323-9>

- Chan, P. C., de Toledo, R. A., & Shim, H. (2018a). Anaerobic co-digestion of food waste and domestic wastewater – Effect of intermittent feeding on short and long chain fatty acids accumulation. *Renewable Energy*, 124, 129–135.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.029>
- Chan, P. C., de Toledo, R. A., & Shim, H. (2018b). Anaerobic co-digestion of food waste and domestic wastewater – Effect of intermittent feeding on short and long chain fatty acids accumulation. *Renewable Energy*, 124, 129–135.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.029>
- Chowdhury, M. M. I., & Nakhla, G. (2016). *Anaerobic Digestion and Co-digestion of Thickened Waste Anaerobic Digestion and Co-digestion of Thickened Waste Activated Sludge (TWAS) and Food Waste (FW) Activated Sludge (TWAS) and Food Waste (FW)*.
<https://ir.lib.uwo.ca/etd>
- Dubrovskis, V., Plme, I., Koteeecs, V., & Straume, I. (2009). *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT INVESTIGATION OF BIOGAS PRODUCTION FROM RELATIVELY DRY BIOMASS*.
- Du, X., Tao, Y., Li, H., Liu, Y., & Feng, K. (2019). Synergistic methane production from the anaerobic co-digestion of *Spirulina platensis* with food waste and sewage sludge at high solid concentrations. *Renewable Energy*, 142, 55–61.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.062>
- Guananga-Diaz, N. I., & Freytez, E. (n.d.). *PROCESOS BIOLÓGICOS APLICADOS A LAS AGUAS RESIDUALES s Grupo de capacitación e investigación pedagógica*.
<https://www.researchgate.net/publication/378770111>
- Henze, M. (2008). *Biological wastewater treatment : principles, modelling and design*. IWA Pub.
- Hosen, S., Fadzillah Mansor, M., & Alam, Z. (2019). ANAEROBIC CO-DIGESTION OF FOOD WASTE AND SEWAGE SLUDGE AS A PROMISING ALTERNATIVE FOR WASTE MANAGEMENT AND ENERGY PRODUCTION. In *Biological and Natural Resources Engineering Journal* (Vol. 2, Issue 1).
- Johnny Harold Rojas Padilla, Mario Alejandro Perez Rincón, Tadeu Fabrício Malheiros, Carlos Arturo Madera Parra, Mariza Guimarães Prota, & Raquel Dos Santos. (2014). Análisis comparativo de modelos e instrumentos de gestión integrada del recurso hídrico en Suramérica: los casos de Brasil y Colombia. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458.
<https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Juan Pablo Rodríguez Miranda, César Augusto García Ubaque, & Janneth Pardo Pinzón. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista Tecnura*, 19(46), 37. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a03>
- Khodabakhshi, A., Hashemi, H., Safari, M., Ebrahimi, A., & Samaei, M. (2015). Feasibility of large amounts biogas production from garbage bioliquid. *International Journal of Health*

System and Disaster Management, 3(3), 147. <https://doi.org/10.4103/2347-9019.157380>

- Marulanda, V. A., Gutierrez, C. D. B., & Alzate, C. A. C. (2019). Thermochemical, biological, biochemical, and hybrid conversion methods of bio-derived molecules into renewable fuels. In *Advanced Bioprocessing for Alternative Fuels, Biobased Chemicals, and Bioproducts: Technologies and Approaches for Scale-Up and Commercialization* (pp. 59–81). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817941-3.00004-8>
- Nihalani, S. A. (2017). Anaerobic co-digestion of food waste for energy production – a review. In *Int. J. Renewable Energy Technology* (Vol. 8).
- Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Marmolejo-Rebellón, L. F. (2016). Influence of the mixing ratio on the anaerobic co-digestion of municipal biowaste with domestic wastewater sludge on methane production. *DYNA (Colombia)*, 83(199), 86–93. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.57382>
- Rakić, N., Šušteršič, V., Gordić, D., Jovičić, N., Bošković, G., & Bogdanović, I. (2024). Characteristics of Biogas Production and Synergistic Effect of Primary Sludge and Food Waste Co-Digestion. *Bioenergy Research*, 17(1), 646–659. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10620-8>
- Rodríguez Balza, M. Y., Machado Torrealba, W. S., & Villamarin Oliveros, A. J. (2019). Muestreo para el control de calidad en el proceso de elaboración de envases metálicos para alimentos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 1–9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.017>
- Rodríguez-Mata, A. E., Gómez-Vidal, E., Lucho-Constantino, C. A., Medrano-Hermosillo, J. A., Baray-Arana, R., & López-Pérez, P. A. (2023). State Estimation in a Biodigester via Nonlinear Logistic Observer: Theoretical and Simulation Approach. *Processes*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/pr11041234>
- Romero Salvador, A. (2010). APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES. In *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)* (Vol. 104, Issue 2).
- Sarizadeh, G., Geravandi, S., Takdastan, A., Javanmaerdi, P., & Mohammadi, M. J. (2022). Efficiency of hospital wastewater treatment system in removal of level of toxic, microbial, and organic pollutant. *Toxin Reviews*, 41(3), 721–730. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.1922923>
- Sims, R. E. H., & Bassam, N. El. (2003). *Chapter 1 Biomass and Resources*. www.ifeed.de
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Energy demand and carbon footprint of treating household food waste compared to its prevention. *Energy Procedia*, 161, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.053>

ANEXO A

Tabla A.1.- Composición del RA del ciclo 2023-1.

Residuo / Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Casaca de piña y corona	175.1	738.9	621.1	1031	1060.9	110.9	47.4	0	0	0	68.8	946.2	0	48.2	179.9	0	0
Tallo de lechuga romana	428.9	518.6	666	1073.1	1605.6	1047.7	606.9	790.3	1055.6	460.4	509.1	690.7	1160.4	260.3	1106.6	600	590.8
Tallo de chile californiano	92.1	0	69	0	59.4	73.4	82.6	0	0	449.5	154	0	155.8	0	0	49.9	42.4
Hueso de aguacate (semilla)	40.3	0															
Cascara de aguacate con trazas de pulpa	160	1.9	630	293.9	479.1	251	375.2	186.9	106.7	154.8	140.9	284.6	391.8	78.8	100.6	199.9	118.1
Cascara de cebolla blanca	109.4	63.5	319.1	180.4	183.4	263.3	258.9	32.4	587.5	209.3	116.5	100.2	523.4	4.6	0	93.2	115.2
Repollo picado	72.5	34.7	0	19.15	0	0	53.7	0	0	0	0	92.1	0	230.5	199	52.5	0
Cascara de melon	59.7	742.6	391.4	650.6	470.2	134.4	580.2	0	0	0	0	1013.7	0	30.8	0	0	57.7
Pan de barra	47.3	46.4	0	0	506.1	0	437.8	0	0	0	39.1	0	53.6	0	0	0	30.1
Cascara de platano	104.2	33.4	0	27.7	128.6	72.2	95.8	0	0	47	0	169.3	116.2	80.4	0	47.7	0
Papa frita	55.7	0	54.7	337.7	0	0	0	0	0	4.6	0	0	59.4	337.4	103.4	959.5	5.3
Carne de res	1.9	0	41.8	8.7	384.9	0	0	119.2	147.8	0	0	0	0	0	2.3	0	0.4
Vastago y centro de manzana verde	5.2	0	0	28.4	0	0	6.6	0	54.5	0	0	0	0	4.8	0	0	10.5
Frijoles fritos	5	0	0	9.5	0	4222.5	79.9	1.3	169.6	0	0	0	0	75.3	5.6	0	0
Tomate picado	9.9	298.7	115.8	0	627.9	82.3	324.1	1346.8	125	71.8	0	47.3	61.9	203.2	83.8	21	40.6
Cascara de papa	18.3	1340.7	1332.1	2397.9	2666.4	758.0	1162.9	883.1	140.8	0	1551.1	0	2590.6	2244.3	3.1	0	417.5
Cascara de naranja	0	209.2	2560.5	1524.5	502.3	337.4	764.8	0	1098	392.2	256.8	728.4	0	1030	65.3	446	1159.1
Limón amarillo picado	0	170.2	435.9	0	361.2	746.5	62.6	0	0	0	7.9	176.1	88.8	0	78.6	132.1	0
Tallo de chile pimiento	0	96.7	89.7	24.69	190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de cebolla morada	0	80.8	96.1	0	90.2	46.5	0	0	61.9	0	0	0	0	0	0	321.3	0
Cascara de tomatillo	0	21.2	0	37.7	585.3	0	0	0	0	0	39.1	0	0	0	0	0	0
Cascara de pepino	0	382.2	722.4	540.9	943.5	1416.9	689.5	0	32.1	0	129.5	831	76.4	0	104.5	1596.8	0
Jicama picada	0	190.2	436.4	0	394.9	0	173.9	0	0	0	0	493.3	0	0	0	0	0
Tortilla de harina	0	188.9	3.6	160.4	57.4	54.1	126.2	0	0	0	42	55.7	0	0	86.4	198.8	0
Bolonia	0	20.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jamon	0	24.4	0	0	0	20.1	0	0	0	0	0	24.3	0	0	0	0	0
Tallo de chile serrano	0	22.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Birote o bolillo	0	90.4	0	0	0	0	0	0	75.7	156.4	0	75.7	514.1	0	0	0	0
Vastago y centro de pera	0	117.7	0	0	133.3	36.8	0	0	0	0	0	40.8	0	0	0	0	0
Limón persa picado	0	14.6	0	0	0	64	37.5	0	0	23.7	40	55	12	71.1	0	74	0
Vastago y centro de manzana roja	0	21.4	0	14.1	0	44.6	25.7	0	96	26.9	0	49.5	100.6	6.9	0	70.7	4.5
Queso amarillo	0	38.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.1	0	4.8	0	0
Hoja del perejil	0	12.2	35.1	0	29.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuernito	0	82.1	0	170.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pollo con mayonesa	0	30.6	0	184.8	0	0	97.4	0	0	0	25.9	0	0	0	0	0	0
Pan de barra integral	0	0	150.1	0	0	0	0	0	0	0	0	156.4	0	259.6	0	219.4	0
Pasta	0	0	31.1	35.3	108.4	39.9	6.7	0	38.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Zanahoria rayada	0	0	41	0	57.2	274.6	100.9	0	1255.4	2719.3	41	0	3122.4	0	0	72.8	0
Tallo de chile jalapeño	0	0	44.3	97.5	23.4	0	0	0	499	0	0	1.5	526.5	33.1	0	11	0.4
Taco de frijol	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chile jalapeño en vinagre	0	0	0	20.3	0	0	0	0	0	0	15.8	0	0	0	0	0	0
Tortilla de maíz	0	0	75.9	65.9	62.7	0	66.3	0	123.7	0	4.9	60.7	242.1	0	50.2	0	0
Carne deshebrada	0	0	0	38.9	0	76.7	24.8	257	291.9	0	0	0	0	0	9.3	121	0
Jitomate picado	0	0	0	200.2	0	0	0	0	0	0	65.6	0	292.2	0	0	0	0
Hoja de cilantro	0	0	0	56	0	0	0	0	48.9	0	0	3.8	21.9	0	23.8	0	0
Cascara de kiwi	0	0	0	27.6	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de sandia	0	0	0	1360.3	964.3	0	1316.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de huevo	0	0	0	16.3	0	22.9	0	0	8.4	36.1	42	60.7	37.2	0	0	52.6	0
hoja y tallo de betabel	0	0	423.6	0	0	0	0	0	103.3	0	0	0	0	0	0	397.5	0
Cascara de papaya	0	0	324.6	0	0	113.4	91.9	0	262.6	0	396.2	563.8	0	0	0	0	12
Espinaca	0	0	15.6	0	0	346.0	0	0	107.7	0	0	0	0	0	0	0	0
Pellejo	0	0	12.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hueso de res	0	0	220.8	0	0	0	621.1	0	0	0	890.7	0	0	0	0	0	0
Tallo de fresa	0	0	0	0	1252.3	272.2	1533.1	0	0	2197.4	0	53.7	1178.4	0	0	1008.6	0
Salchicha	0	0	0	0	0	0	95.4	0	0	0	48.2	0	0	0	0	0	0
Tomate Cherry	0	0	0	0	370.5	44.5	72.9	0	54.8	0	0	0	0	0	0	47.9	0
Chuleta	0	0	0	0	0	629.7	19.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tallo de chile de árbol	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de guayaba	0	0	0	0	0	179	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tayo de chile Güero	0	0	0	0	0	14.4	0	0	0	0	0	0	18.3	0	0	0	0
Apio	0	0	0	0	0	795.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de mango	0	0	0	0	156.2	0	0	0	0	0	4680.8	57.2	1061.7	0	0	0	0
Hueso del mango	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3024.5	0	1261.3	0	0	0	0
Zanahoria con vinagre	0	0	0	0	0	0	0	91.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tallo de cebolla cambray	0	0	0	0	0	0	0	22.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calabazita	0	0	0	0	0	0	0	0	36.9	0	0	0	0	0	0	0	0
Tamarindo	0	0	0	0	120.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Espárragos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180.2	0	0	0	0	0	0	0
Champiñón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23.2	0	0	0	0	0	0	0
Queso seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.4	0	0	0	0	0	0	0
Tallo de chile morron	0	0	0	0	0	0	0	0	21.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de ajo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0
Jamaica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	473.2	0	0	0	0
Chicharrón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53.2	4.4	0	0	0
Tocino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13.3	0	0	0	0	172.3	0
Irreconocible/Inseparable	0	122	870.6	17.9	1509.4	1999.8	416.6	74.7	603.8	140.2	640.4	632.7	72.2	0	133	0	0
TOTAL(g)	1385.5	5754.8	10845.5	10651.74	16085.1	14592.2	10479.3	3806.4	7206.8	7319.4	12984.6	7464.4	14270.7	5003.7	2340.2	6966.5	2604.6
TOTAL(kg)	1.3855	5.7548	10.8455	10.65174	16.0851	14.5922	10.4793	3.8064	7.2068	7.3194	12.9846	7.4644	14.2707	5.0037	2.3402	6.9665	2.6046

Tabla A.2.- Composición del RA del ciclo 2023-2.

Residuo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Tallo de lechuga romana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tallo de chile californiano	889.5	1364.5	1911	502.4	1476.7	1188.8	494.1	948.3	1193.2	744.4	1498.2	284.6	431.5	768.6	497.5	492.5	0
Cascara de aguacate con trazas de pulpa y semilla	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de cebolla blanca																	
Repollo picado	128.6	104.5	610.6	51.2	267.3	233.3	35.5	229.2	742	44.2	105.3	396.4	71	32.2	94.4	15.3	0
Cascara de platano	274.4	133.4	224	25.5	357.9	157.4	31.3	39.1	62.1	55.1	57.9	18	0	8.2	23.9	6	0
Papa frita	0	0	202	0	137.9	0	0	0	0	44.3	205.3	144.8	0	0	0	0	0
Carne de res	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vastago y centro de manzana verde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frijoles fritos	248	19.3	52.6	31.7	170	49.3	42.1	147.8	67.8	0	197.4	0	0	0	0	0	0
Tomate picado	0	0	0	380.5	0	0	0	148	410.5	0	0	0	43.9	2.1	0	0	0
Cascara de papa	67.7	0	0	14.3	0	87.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de naranja	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0
Limón amarillo picado	9.8	0	0	29.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de cebolla morada	92.7	43	145.8	58.5	32.7	206.7	5.5	145.7	81.4	38.4	42.4	0	26.1	42.4	82.2	19.6	0
Cascara de pepino	1580.6	3012	892.2	1429.9	4225.1	0.0	2062.7	0	1420.2	2016.8	1358.5	2163.1	0	0	0	409.6	0
Jicama picada	568.2	0	429.4	440.5	0	0	586.8	0	429.4	146	2619	262.1	402.5	0	0	276.9	0
Tortilla de harina	0	0	0	0	80.8	0	0	30.4	0	0	0	0	0	0	0	13.7	0
Jamon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tallo de chile serrano	38.4	75	0	130.2	0	31.7	0	10.7	0	50.1	0	0.2	0	0	67.3	0	0
Birote o bolillo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Limon persia picado	192.6	356.1	26.9	253.9	0	593.2	269.6	354.9	405.7	335.9	590.3	369.8	0	0	399.6	109.7	0
Vastago y centro de manzana roja	0	159.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Queso amarillo	0	296	0	0	223.3	581.7	59.6	0	0	61.8	130.6	0	0	0	61.9	0	0
Cuernito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pollo con mayonesa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81.5	0	0
Pan de barra integral	0	0	0	71.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasta	173.5	48.4	227.4	0	0	57.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.3	0
Zanahoria rayada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tallo de chile jalapeño	0	11.01	0	50.2	70.4	32.3	0	0	0	20.5	0	0	0	0	0	36.5	0
Tortilla de maíz	0	0	25.4	0	57.5	44.6	29	10.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carne deshebrada	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	54.5	0	0
Jitomate picado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hoja de cilantro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33.8	0	0	0	0	0	0	0
Cascara de huevo	4.4	0	0	0	0	0	0	5.2	53.1	0	0	0	0	0	2.3	0	0
Cascara de papaya	80.5	25.3	292.6	0	138.3	0	442	342.3	118.1	0	455.2	0	262.1	45.2	163.3	0	0
Hueso de res	2	0	0	0	0	60.7	0	0	29.4	6.4	0	8.3	0	0	1851.6	0	0
Tomate Cherry	24.7	33.3	846	65.7	0	9.9	69	1664	53	45.9	202.1	84.8	0	0	63.2	0	0
Tallo de chile de árbol	0	0	0	0	0	3.9	0	601.5	7.2	0	0	0	0	0	21.5	0	0
Tayo de chile Güero	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calabazita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Esparragos	92.7	0	19.3	0	0	0	0	104.4	0	33.7	24.5	3.9	0	0	0	0	0
Champiñon	0	0	0	0	0	0	0	42.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tallo de chile morron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	412	0	0	0	0	0	0
Cascara de ajo	6.5	15.7	126.3	15.8	9.8	0	9.4	0	5.8	0.2	1.2	19.9	0	0	0	0	0
Jamaica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chicharrón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acelga	31.5	0	25.6	0	0	0	0	5.5	0	0	28.3	26.9	0	7.5	0	30.7	0
Aceituna negra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salchicha para asar (Buba)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140.8	0	0	0	0	0	0	0
Jamón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Muffin de chocolate	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Waffle	0	0	0	0	0	0	0	1133.3	0	0	853	0	0	0	0	0	0
Chicle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Col morada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pan para hot dog	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20.2	0	0
Pavo (pavo y huesos chicos)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pavo (huesos, cartilago y pavo)	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Irreconosible/inseparable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chile Güero	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.2	0
Apio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mango	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hueso del mango	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zanahoria con vinagre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cebolla cambray	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calabazita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46.8	0	0	0	159.7	0	0
Tamarindo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Esparragos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	156.9	0	0	0	0	0	0
Champiñon	0	0	0	0	2.2	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
Queso seco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chile morron	0	108.3	0	0	0	0	0	0	0	77	0	69.3	0	0	0	0	0
Cascara de ajo	0	0	0	0	0	0	0	0	3.3	0	0	0	0	0	0	0	0
Jamaica	0	0	0	0	0	283.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chicharrón	0	0	0	0	70.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acelga	89.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aceituna negra	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salchicha para asar (Buba)	6.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jamón	1.4	0	0	0	0	0	0	37.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Muffin de chocolate	20.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Waffle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	148.2	0	0	0	0	0	0
Chicle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6	0	0
Col morada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74.4	0	0
Pan para hot dog	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18.9	0	0
Pavo (pavo y huesos chicos)	0	0	386.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pavo (huesos, cartilago y pavo)	0	0	2324.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tocino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Irreconosible/inseparable	313.5	498.4	224	707.2	0	219.2	572	123	194.4	2081.8	583.7	0	0	4.6	153.3	11.2	1406.8
TOTAL(g)	5022.8	6303.81	8991.5	4257.9	7320.3	3841.6	4708.6	6125.6	5277.5	5889.1	9246.4	4441.6	1241	910.8	3892.8	1450.2	1406.8
TOTAL(kg)	5.0228	6.30381	8.9915	4.2579	7.3203	3.8416	4.7086	6.1256	5.2775	5.8891	9.2464	4.4416	1.241	0.9108	3.8928	1.4502	1.4068

ANEXO B

Tabla B.1.- Densidad de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Semana	Densidad (g/L)				
	RA	25%	50%	75%	AR
1	1046.26467	990.47533	995.88667	1010.33133	1031.12867
2	1053.11267	991.00133	1000.858	1024.80667	1039.65667
3	1040.22933	989.46667	996.52467	1015.98467	1025.748
4	1056.71667	1001.267	1014.076	1024.214	1031.806
5	1046.972	1002.58	1001.03467	1034.514	1024.35133
6	1024.36667	995.67867	1010.45533	1014.85733	1025.09133
7	1051.636	987.032	999.09533	1020.24667	1031.27533
8	1034.508	999.91267	1003.95067	1022.60733	1036.65267
9	1047.18933	994.71867	1009.38667	1023.72267	1033.48333
10	1049.18333	979.412	1007.72467	1016.786	1032.32533
11	1051.26133	1001.53133	1009.17333	1029.62933	1042.962
12	1062.308	995.00067	1013.85533	1014.42667	1051.71333
13	1054.58467	1023.81933	1010.42	1020.39867	1035.07133
14	1073.08733	980.69533	1002.03	1016.636	1037.596
15	1044.17067	1004.578	1006.644	1014.42133	1024.84733
16	1050.01133	998.20067	1004.76467	1031.69533	1049.964
17	1045.55533	1002.448	1010.564	1018.54467	1042.21
18	1064.74067	999.30467	1010.49133	1025.48667	1038.63467
19	1064.05	997.91933	1009.07133	1029.80467	1043.13667
20	1054.89	997.91933	1008.63533	1024.382	1041.42133
21	1046.608	996.96067	1009.44667	1028.514	1039.61533
22	1041.04467	1002.17067	1011.88917	1021.60767	1031.32617
26	1051.96533	998.27467	1011.69733	1025.12	1038.54267
27	1067.10667	992.55467	1011.19267	1029.83067	1048.46867
28	1060.58133	1001.33133	1016.14383	1030.95633	1045.76883
29	1040.41	996.89467	1007.7735	1018.65233	1029.53117
30	1078.078	998.66467	1018.518	1038.37133	1058.22467
31	1039.21267	995.148	1006.16417	1017.18033	1028.1965
32	1032.10867	989.18467	999.91567	1010.64667	1021.37767
33	1046.85667	992.14	1005.81917	1019.49833	1033.1775
34	992.84733	1003.33267	1000.71133	998.09	995.46867

Tabla B.2.- Porcentaje de humedad de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Humedad (%)					
Semana	RA	25%	50%	75%	AR
1	82.71956	99.88011	95.23969	92.75692	86.26193
2	82.55214	99.85967	95.48659	91.13227	86.886
3	80.68304	99.8451	94.89953	89.44463	85.31442
4	83.85369	99.82385	95.56283	91.45687	87.78667
5	82.89405	99.86368	95.90198	91.71091	87.29517
6	79.85505	99.84852	94.63759	89.7358	84.96786
7	83.18526	99.84227	95.53209	91.24699	86.79087
8	86.34474	99.84282	96.30118	92.77562	89.39897
9	82.63988	99.85758	95.46309	90.50535	87.04903
10	83.91537	99.8328	95.52518	91.35495	87.52063
11	79.55665	99.84541	94.47392	89.11532	83.59958
12	81.91881	99.85092	95.24691	90.43623	86.62047
13	81.82578	99.84943	94.80646	90.25195	86.2828
14	76.9967	99.83714	93.43005	87.56631	81.81599
15	85.05006	99.84086	96.19714	92.77561	89.14414
16	84.86461	99.84909	95.99734	92.10479	88.3291
17	81.24766	99.84684	95.36301	90.84355	86.53347
18	77.93659	99.56115	93.95273	88.23306	83.75856
19	78.69046	99.85148	94.25152	88.81998	83.84461
20	80.4657	99.85148	94.50174	89.44142	84.60541
21	80.93121	99.8581	94.78161	90.02732	85.44949
22	83.60451	99.87727	95.80908	91.74089	87.6727
26	79.15754	99.81996	94.65435	89.48875	84.32315
27	82.65743	99.82468	95.53287	91.24106	86.94924
28	82.62593	99.83515	95.53285	91.23054	86.92824
29	85.69743	99.82629	96.29408	92.76186	89.22964
30	75.83205	99.84705	93.8433	87.83955	81.8358
31	93.38242	99.81745	98.20869	96.59993	94.99118
32	77.30272	99.84446	94.20902	88.57359	82.93815
33	88.20618	99.83525	96.92798	94.02072	91.11345
34	94.64248	99.82273	98.52767	97.2326	95.93754

Tabla B.3.- Porcentaje de Sólidos Totales de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Sólidos Totales (%)					
Semana	RA	25%	50%	75%	AR
1	17.28044	0.11989	4.76031	7.24308	13.73807
2	17.44786	0.14033	4.51341	8.86773	13.114
3	19.31696	0.1549	5.10047	10.55537	14.68558
4	16.14631	0.17615	4.43717	8.54313	12.21333
5	17.10595	0.13632	4.09802	8.28909	12.70483
6	20.14495	0.15148	5.36241	10.2642	15.03214
7	16.81474	0.15773	4.46791	8.75301	13.20913
8	13.65526	0.15718	3.69882	7.22438	10.60103
9	17.36012	0.14242	4.53691	9.49465	12.95097
10	16.08463	0.1672	4.47482	8.64505	12.47937
11	20.44335	0.15459	5.52608	10.88468	16.40042
12	18.08119	0.14908	4.75309	9.56377	13.37953
13	18.17422	0.15057	5.19354	9.74805	13.7172
14	23.0033	0.16286	6.56995	12.43369	18.18401
15	14.94994	0.15914	3.80286	7.22439	10.85586
16	15.13539	0.15091	4.00266	7.89521	11.6709
17	18.75234	0.15316	4.63699	9.15645	13.46653
18	22.06341	0.43885	6.04727	11.76694	16.24144
19	21.30954	0.14852	5.74848	11.18002	16.15539
20	19.5343	0.14852	5.49826	10.55858	15.39459
21	19.06879	0.1419	5.21839	9.97268	14.55051
22	16.39549	0.12273	4.19092	8.25911	12.3273
26	20.84246	0.18004	5.34565	10.51125	15.67685
27	17.34257	0.17532	4.46713	8.75894	13.05076
28	17.37407	0.16485	4.46715	8.76946	13.07176
29	14.30257	0.17371	3.70592	7.23814	10.77036
30	24.16795	0.15295	6.1567	12.16045	18.1642
31	6.61758	0.18255	1.79131	3.40007	5.00882
32	22.69728	0.15554	5.79098	11.42641	17.06185
33	11.79382	0.16475	3.07202	5.97928	8.88655
34	5.35752	0.17727	1.47233	2.7674	4.06246

Tabla B.4.- Porcentaje de Sólidos Fijos de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Sólidos Fijos (%)					
Semana	RA	25%	50%	75%	AR
1	8.10258	77.15381	7.87681	7.14215	8.81302
2	7.25569	74.77421	7.74799	7.14215	7.02369
3	8.01993	59.45582	8.19474	7.48554	8.05525
4	8.39184	67.30378	8.79523	7.70001	7.36742
5	7.64229	71.76709	7.94874	6.58815	7.1947
6	7.52314	67.65356	7.74468	7.86226	8.08516
7	8.72341	70.28282	8.03352	7.39703	7.04967
8	11.11186	72.09672	10.96254	10.10464	10.24033
9	8.25851	75.3246	10.45974	9.02666	9.4499
10	9.24237	77.71125	11.09098	10.08838	9.51081
11	8.40945	75.77494	7.81163	7.33624	7.47571
12	9.34611	69.68438	8.84286	9.17877	7.05653
13	9.88157	72.10755	9.322	8.3022	8.55673
14	7.83013	73.62799	6.24742	5.74395	5.86632
15	7.28289	73.96732	8.89309	8.08929	7.58836
16	9.36845	71.5156	9.71366	8.18702	7.87371
17	6.88388	69.44361	7.06338	6.00589	5.61121
18	10.35144	74.2785	9.2329	9.16649	9.17761
19	6.83932	76.79221	7.79246	8.04727	9.14266
20	7.65587	76.79221	8.58393	7.71742	8.00327
21	10.60845	77.3618	7.59378	8.85048	9.98709
22	8.28966	81.7054	9.878	8.82635	8.46891
26	8.70205	69.36663	10.17565	9.19902	8.86627
27	8.88046	77.14989	10.81431	9.53765	9.10111
28	6.97921	74.65454	8.77532	7.58867	7.18357
29	11.053	73.193	13.18332	11.77885	11.29596
30	4.29429	78.8616	5.61427	4.73934	4.44303
31	16.77248	71.97431	20.91297	18.22529	17.26539
32	7.99731	84.75845	32.96599	18.18963	11.67112
33	16.49838	76.1268	18.83744	17.30042	16.76959
34	18.08888	79.16495	23.87478	20.14755	18.7909

Tabla B.5.- Porcentaje de Sólidos Volátiles de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Sólidos Volátiles (%)					
Semana	RA	25%	50%	75%	AR
1	91.89742	22.84619	92.12319	89.25994	91.18698
2	92.74431	25.22579	92.25201	92.85785	92.97631
3	91.98007	40.54418	91.80526	92.51446	91.94475
4	91.60816	32.69622	91.20477	92.29999	92.63258
5	92.35771	28.23291	92.05126	93.41185	92.8053
6	92.47686	32.34644	92.25532	92.13774	91.91484
7	91.27659	29.71718	91.96648	92.60297	92.95033
8	88.88814	27.90328	89.03746	89.89536	89.75967
9	91.74149	24.6754	89.54026	90.97334	90.5501
10	90.75763	22.28875	88.90902	89.91162	90.48919
11	91.59055	24.22506	92.18837	92.66376	92.52429
12	90.65389	30.31562	91.15714	90.82123	92.94347
13	90.11843	27.89245	90.678	91.6978	91.44327
14	92.16987	26.37201	93.75258	94.25605	94.13368
15	92.71711	26.03268	91.10691	91.91071	92.41164
16	90.63155	28.4844	90.28634	91.81298	92.12629
17	93.11612	30.55639	92.93662	93.99411	94.38879
18	89.64856	25.7215	90.7671	90.83351	90.82239
19	93.16068	23.20779	92.20754	91.95273	90.85734
20	92.34413	23.20779	91.41607	92.28258	91.99673
21	89.39155	22.6382	92.40622	91.14952	90.01291
22	91.71034	18.2946	90.122	91.17365	91.53109
26	91.29795	30.63337	89.82435	90.80098	91.13373
27	91.11954	22.85011	89.18569	90.46235	90.89889
28	93.02079	25.34546	91.22468	92.41133	92.81643
29	88.947	26.807	86.81668	88.22115	88.70404
30	95.70571	21.1384	94.38573	95.26066	95.55697
31	83.22752	28.02569	79.08703	81.77471	82.73461
32	92.00269	15.24155	67.03401	81.81037	88.32888
33	83.50162	23.8732	81.16256	82.69958	83.23041
34	81.91112	20.83505	76.12522	79.85245	81.2091

Tabla B.6.- Cantidad de Sólidos Totales de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Semana	Solidos Totales (mg/L)				
	RA	25%	50%	75%	AR
1	177239.33333	1178.66667	46926	70765.33333	136985.33333
2	179160	1382.66667	44756	88468	129708
3	199228	1519.33333	50259.33333	97583.33333	146822.66667
4	165180.66667	1750.66667	43890.66667	85132	120188.66667
5	171015.33333	1360	40550.66667	82986	120107.33333
6	196706	1502.66667	53547.33333	100951.33333	146464.66667
7	171871.33333	1544	44204.66667	85776	119306.66667
8	134408	1558	36828.66667	72630.66667	105042
9	177951.33333	1406	45546.66667	91066.66667	131725.33333
10	161962	1627.33333	44558	85853.33333	126002
11	202838.66667	1535.33333	55177.33333	101682.66667	161326
12	182918	1472.66667	47655.33333	91049.33333	135526.66667
13	184802.66667	1512.66667	51832	85602	135718
14	239732	1588	53053.33333	119700	177312.66667
15	148173.33333	1590.66667	37842	70915.33333	106009.33333
16	147499.33333	1499.33333	39777.33333	79350.66667	107573.33333
17	190726	1526.66667	46354.66667	84387.33333	134900
18	229843.33333	4371.33333	60382	112554	162644
19	217432.66667	1476	57354.66667	112119.33333	162916.66667
20	200112.66667	1476	54696	102262.66667	153936
21	194316	1405.33333	52036	96690	148487.33333
22	165844.66667	1223.33333	42378.66667	83534	124689.33333
26	214657.33333	1786	55003.83333	108221.66667	161439.5
27	178048.66667	1730	45809.66667	89889.33333	133969
28	180604	1641.33333	46382	91122.66667	135863.33333
29	145540.66667	1723.33333	37677.66667	73632	109586.33333
30	252554.66667	1517.33333	64276.66667	127036	189795.33333
31	66788	1805.33333	18051	34296.66667	50542.33333
32	223036	28191.33333	76902.5	125613.66667	174324.83333
33	119539.33333	1625.33333	31103.83333	60582.33333	90060.83333
34	50819.33333	1772.66667	14034.33333	26296	38557.66667

Tabla B.7.- Cantidad de Sólidos Totales Volátiles volátiles de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Semana	Solidos Totales Volátiles (mg/L)				
	RA	25%	50%	75%	AR
1	162871.33333	275.33333	43241.33333	63296.66667	124920.66667
2	166161.33333	348.66667	41288.66667	82148.66667	120600
3	183248	616	46142.66667	90280.66667	134997.33333
4	151320	572.66667	40030.66667	78576	111334.66667
5	157946	384	37328	77520.66667	111474.66667
6	182011.33333	486	49401.06667	93015.33333	134637.33333
7	156880	458.66667	40654	79431.33333	110896
8	119471.33333	434.66667	32790.66667	65298	94288
9	163256.66667	347.33333	41321.33333	82846.66667	119274
10	146993.33333	362.66667	39618.66667	77194	114022
11	185780	372	50874	94224.66667	149272.66667
12	165822	446.66667	43442.66667	82682.66667	125975.33333
13	166522	422	47003.33333	78494.66667	124102.66667
14	220968.66667	406	49736.66667	112836.66667	166908
15	137382.66667	414	34477.33333	65176	97966
16	133669.33333	427.33333	35914	72854.66667	99104.66667
17	177600.66667	466	43083.33333	79321.33333	127330
18	206051.33333	3340.66667	54806.66667	102232	147739.33333
19	202572	342.66667	52882	103111.33333	148070.66667
20	184794.66667	342.66667	50001.33333	94371.33333	141616.66667
21	173702	318.66667	48086.66667	88122.66667	133635.33333
22	152098	224	38192.5	76161	114129.5
26	195985.33333	547.33333	49406.83333	98266.33333	147125.83333
27	162236.66667	395.33333	40855.66667	81316	121776.33333
28	167999.33333	416	42311.83333	84207.66667	126103.5
29	129456	462	32710.5	64959	97207.5
30	241710	320.66667	60668	121015.33333	181362.66667
31	55586	506	14276	28046	41816
32	205193.33333	336.66667	51550.83333	102765	153979.16667
33	99814.66667	388	25244.66667	50101.33333	74958
34	41626.66667	369.33333	10683.66667	20998	31312.33333

Tabla B.8.- Cantidad de Sólidos Totales Fijos fijos de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Solidos Totales Fijos (mg/L)					
Semana	RA	25%	50%	75%	AR
1	14368	903.33333	3684.66667	7468.66667	12064.66667
2	12998.66667	1034	3467.33333	6319.33333	9108
3	15980	903.33333	4116.66667	7302.66667	11825.33333
4	13860.66667	1178	3860	6556	8854
5	13069.33333	976	3222.66667	5465.33333	8632.66667
6	14694.66667	1016.66667	4146.26667	7936	11827.33333
7	14991.33333	1085.33333	3550.66667	6344.66667	8410.66667
8	14936.66667	1123.33333	4038	7332.66667	10754
9	14694.66667	1058.66667	4225.33333	8220	12451.33333
10	14968.66667	1264.66667	4939.33333	8659.33333	11980
11	17058.66667	1163.33333	4303.33333	7458	12053.33333
12	17096	1026	4212.66667	8366.66667	9551.33333
13	18280.66667	1090.66667	4828.66667	7107.33333	11615.33333
14	18763.33333	1182	3316.66667	6863.33333	10404.66667
15	10790.66667	1176.66667	3364.66667	5739.33333	8043.33333
16	13830	1072	3863.33333	6496	8468.66667
17	13125.33333	1060.66667	3271.33333	5066	7570
18	23792	1030.66667	5575.33333	10322	14904.66667
19	14860.66667	1133.33333	4472.66667	9008	14846
20	15318	1133.33333	4694.66667	7891.33333	12319.33333
21	20614	1086.66667	3949.33333	8567.33333	14852
22	13746.66667	999.33333	4186.16667	7373	10559.83333
26	18672	1238.66667	5597	9955.33333	14313.66667
27	15812	1334.66667	4954	8573.33333	12192.66667
28	12604.66667	1225.33333	4070.16667	6915	9759.83333
29	16084.66667	1261.33333	4967.16667	8673	12378.83333
30	10844.66667	1196.66667	3608.66667	6020.66667	8432.66667
31	11202	1299.33333	3775	6250.66667	8726.33333
32	17842.66667	1177	5343.41667	9509.83333	13676.25
33	19724.66667	1237.33333	5859.16667	10481	15102.83333
34	9192.66667	1403.33333	3350.66667	5298	7245.33333

Tabla B.9.-Demanda Química de Oxígeno de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (mg/L)					
SEMANA	RESIDUOS DE ALIMENTOS	AGUAS RESIDUALES	25% RA / 75% AR	50% RA / 50% AR	75% RA / 25% AR
1	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
2	313650	420	18450	143500	135300
3	662150	820	94300	211150	264450
4	680600	1160	51250	141450	243950
5	459200	450	200900	69700	483800
6	385400	1350	82000	305450	303400
7	467400	710	123000	159900	309550
8	418200	750	59450	75850	481750
9	436650	650	100450	219350	291100
10	383350	690	71750	190650	299300
11	494050	800	71750	311600	256250
12	508400	630	73800	233700	334150
13	414100	970	34850	330050	514550
14	446900	660	94300	239850	284950
15	287000	860	18450	155800	274700
16	342350	1170	75850	123000	219350
17	465350	1590	N/R	N/R	N/R
18	471500	580	130200	211200	321200
19	571950	480	231000	286000	412500
20	551450	480	241500	261800	462000
21	690850	420	254100	224400	388300
22	317750	310	N/R	N/R	N/R
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	403850	1220	N/R	N/R	N/R
27	270600	870	N/R	N/R	N/R
28	303400	950	N/R	N/R	N/R
29	276750	770	N/R	N/R	N/R
30	448950	620	N/R	N/R	N/R
31	84050	750	N/R	N/R	N/R
32	553500	790	N/R	N/R	N/R
33	217300	540	N/R	N/R	N/R
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla B.10.-Carbono Orgánico Total de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Carbono Orgánico Total (mg/L)					
SEMANA	RESIDUOS DE ALIMENTOS	AGUAS RESIDUALES	25% RA / 75% AR	50% RA / 50% AR	75% RA / 25% AR
1	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
2	65124	153	13869	45426	23718
3	41004	271	19095	28341	41205
4	56481	235	15678	29346	48240
5	20703	63	4623	8844	10854
6	55677	235	22914	30552	42411
7	56481	209	20301	29547	43416
8	53064	192	14271	19698	37185
9	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
10	50652	147	16281	23919	38391
11	43416	175	13467	35577	44622
12	77184	54	4422	9045	16683
13	95877	58	4422	7839	11457
14	78591	181	17688	34170	77184
15	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
16	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
17	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
18	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
19	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
20	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
21	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
22	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	87435	240	20503	37067	55045
27	73767	169	17776	32219	52217
28	96078	148	N/R	N/R	N/R
29	39798	174	N/R	N/R	N/R
30	95274	135	N/R	N/R	N/R
31	20502	189	N/R	N/R	N/R
32	102108	141	N/R	N/R	N/R
33	51858	167	N/R	N/R	N/R
34	21909	315	N/R	N/R	N/R

Tabla B.11.-Nitrógeno Total de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones.

Nitrógeno Total (mg/L)					
SEMANA	RESIDUOS DE ALIMENTOS	AGUAS RESIDUALES	25% RA / 75% AR	50% RA / 50% AR	75% RA / 25% AR
1	N/R	58	N/R	N/R	N/R
2	6560	56	N/R	2310	474
3	12300	62	1533	2625	228
4	3485	81	1533	2310	558
5	6560	62	N/R	3936	642
6	7995	52	2279	3255	102
7	6150	49	1236.67	2541	870
8	6970	53	1501.67	3087	3080
9	9635	57	2508.67	4949	618
10	5125	54	505	2222	5858
11	4305	48	816	1818	2727
12	6355	43	404	1616	4141
13	4305	61	1377	2020	3636
14	5125	38	1224	2121	2727
15	1845	44	202	1010	2020
16	3485	52	2613	1414	4949
17	4920	53	N/R	N/R	N/R
18	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
19	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
20	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
21	5427	46	1579.33	2746.67	3914
22	4623	47	1064.33	1854	2884
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	6030	62	N/R	N/R	N/R
27	4221	53	N/R	N/R	N/R
28	3216	61	N/R	N/R	N/R
29	3216	48	N/R	N/R	N/R
30	7437	57	N/R	N/R	N/R
31	2010	76	N/R	N/R	N/R
32	5226	49	N/R	N/R	N/R
33	3015	53	N/R	N/R	N/R
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

ANEXO C

Tabla C.1.- Potencial de Biogás de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 1.

SEMANA	Potencial de biogás(m ³ /día)				
	RA	AR	25%	50%	75%
1	0.4711	0.0236	0.3112	0.3849	0.4389
2	1.9748	0.1084	1.2598	1.6398	1.8484
3	3.6910	0.2985	2.0789	2.8648	3.3426
4	3.6104	0.2601	2.1110	2.8740	3.3410
5	5.4967	0.3392	3.3867	4.5206	5.1156
6	4.9929	0.3525	2.9454	3.9457	4.5490
7	3.5391	0.2326	2.1596	2.8867	3.3224
8	1.2519	0.0793	0.7686	1.0246	1.1686
9	2.4463	0.1328	1.5366	2.0154	2.2560
10	2.4579	0.1218	1.5926	2.0518	2.3026
11	4.4003	0.2349	2.8651	3.7086	4.1577
12	2.5037	0.1690	1.5113	2.0066	2.3615
13	4.7584	0.2973	2.9480	3.9284	4.4679
14	1.7064	0.0986	1.0958	1.4352	1.6217
15	0.8028	0.0455	0.5010	0.6566	0.7455
16	2.3361	0.1482	1.4258	1.9149	2.1949
17	0.8974	0.0594	0.5410	0.7272	0.8380
18	1.6661	0.0965	1.0641	1.3877	1.5703
19	2.1729	0.1093	1.4165	1.8033	1.9895
20	3.0722	0.1559	1.9979	2.5780	2.8718
21	1.4083	0.0720	0.9541	1.2044	1.3300
22	2.4840	0.1000	1.7116	2.1417	2.3558
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	1.7828	0.1207	1.0517	1.4175	1.6367
27	1.9855	0.1005	1.2774	1.6557	1.8587
28	3.1824	0.1750	2.0006	2.6212	2.9644
29	1.4617	0.0889	0.8860	1.1818	1.3515
30	0.4395	0.0196	0.2955	0.3743	0.4148
31	0.2805	0.0191	0.1596	0.2202	0.2564
32	1.3251	0.0659	0.8624	1.1104	1.2427
33	0.4480	0.0259	0.2750	0.3650	0.4156
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla C.2.- Potencial de Metano de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 1.

Potencial de Metano (m³/día)					
SEMANA	RA	AR	25%	50%	75%
1	0.3062	0.0154	0.2023	0.2502	0.2853
2	1.2836	0.0705	0.8189	1.0658	1.2014
3	2.3992	0.1941	1.3513	1.8621	2.1727
4	2.3468	0.1691	1.3722	1.8681	2.1716
5	3.5728	0.2205	2.2014	2.9384	3.3252
6	3.2454	0.2291	1.9145	2.5647	2.9569
7	2.3004	0.1512	1.4037	1.8763	2.1596
8	0.8137	0.0516	0.4996	0.6660	0.7596
9	1.5901	0.0863	0.9988	1.3100	1.4664
10	1.5976	0.0792	1.0352	1.3337	1.4967
11	2.8602	0.1527	1.8623	2.4106	2.7025
12	1.6274	0.1099	0.9823	1.3043	1.5350
13	3.0930	0.1932	1.9162	2.5535	2.9042
14	1.1092	0.0641	0.7123	0.9329	1.0541
15	0.5218	0.0296	0.3257	0.4268	0.4846
16	1.5185	0.0963	0.9268	1.2447	1.4267
17	0.5833	0.0386	0.3517	0.4727	0.5447
18	1.0829	0.0627	0.6916	0.9020	1.0207
19	1.4124	0.0710	0.9207	1.1722	1.2932
20	1.9969	0.1013	1.2986	1.6757	1.8667
21	0.9154	0.0468	0.6202	0.7829	0.8645
22	1.6146	0.0650	1.1125	1.3921	1.5312
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	1.1588	0.0785	0.6836	0.9214	1.0638
27	1.2906	0.0653	0.8303	1.0762	1.2082
28	2.0686	0.1138	1.3004	1.7038	1.9269
29	0.9501	0.0578	0.5759	0.7682	0.8785
30	0.2856	0.0127	0.1921	0.2433	0.2696
31	0.1823	0.0124	0.1038	0.1431	0.1666
32	0.8613	0.0428	0.5606	0.7217	0.8078
33	0.2912	0.0168	0.1788	0.2373	0.2701
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla C.3.- Potencial Energético de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 1.

Potencial Energético (kWh/día)					
SEMANA	RA	AR	25%	50%	75%
1	9.7356	0.4886	6.4319	7.9535	9.0703
2	40.8104	2.2407	26.0356	33.8868	38.1980
3	76.2775	6.1697	42.9622	59.2036	69.0776
4	74.6118	5.3756	43.6264	59.3932	69.0438
5	113.5925	7.0095	69.9892	93.4207	105.7185
6	103.1827	7.2854	60.8682	81.5415	94.0086
7	73.1383	4.8067	44.6296	59.6554	68.6597
8	25.8709	1.6394	15.8830	21.1749	24.1494
9	50.5547	2.7448	31.7552	41.6506	46.6213
10	50.7939	2.5181	32.9117	42.4018	47.5851
11	90.9352	4.8551	59.2085	76.6416	85.9219
12	51.7409	3.4928	31.2318	41.4682	48.8015
13	98.3358	6.1438	60.9234	81.1837	92.3335
14	35.2641	2.0368	22.6461	29.6590	33.5126
15	16.5907	0.9403	10.3535	13.5688	15.4066
16	48.2777	3.0629	29.4655	39.5727	45.3598
17	18.5447	1.2284	11.1804	15.0280	17.3188
18	34.4304	1.9941	21.9896	28.6779	32.4511
19	44.9044	2.2581	29.2729	37.2671	41.1142
20	63.4884	3.2209	41.2872	53.2756	59.3474
21	29.1035	1.4878	19.7182	24.8896	27.4850
22	51.3334	2.0671	35.3707	44.2591	48.6836
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	36.8419	2.4953	21.7346	29.2940	33.8230
27	41.0311	2.0770	26.3989	34.2167	38.4116
28	65.7666	3.6173	41.3440	54.1696	61.2613
29	30.2081	1.8378	18.3105	24.4236	27.9306
30	9.0816	0.4049	6.1075	7.7342	8.5712
31	5.7962	0.3940	3.2987	4.5500	5.2978
32	27.3852	1.3619	17.8221	22.9463	25.6817
33	9.2592	0.5344	5.6834	7.5430	8.5883
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla C.4.- Equivalencias de masa y volumen de los residuos Caso 1.

SEMANA	Mezcla kg/día			Litros de aguas residuales			Kg de aguas residuales		
	1:3	1:1	3:1	1:3	1:1	3:1	25% (1:3)	50% (1:1)	75% (3:1)
1	1.39	1.39	1.39	1.05	0.70	0.35	1.04	0.69	0.35
2	5.75	5.75	5.75	4.36	2.91	1.45	4.32	2.88	1.44
3	10.85	10.85	10.85	8.21	5.47	2.74	8.13	5.42	2.71
4	10.65	10.65	10.65	8.07	5.38	2.69	7.99	5.33	2.66
5	16.09	16.09	16.09	12.18	8.12	4.06	12.06	8.04	4.02
6	14.59	14.59	14.59	11.05	7.37	3.68	10.94	7.30	3.65
7	10.48	10.48	10.48	7.94	5.29	2.65	7.86	5.24	2.62
8	3.81	3.81	3.81	2.88	1.92	0.96	2.85	1.90	0.95
9	7.21	7.21	7.21	5.46	3.64	1.82	5.41	3.60	1.80
10	7.32	7.32	7.32	5.54	3.69	1.85	5.49	3.66	1.83
11	12.98	12.98	12.98	9.83	6.55	3.28	9.74	6.49	3.25
12	7.46	7.46	7.46	5.65	3.77	1.88	5.60	3.73	1.87
13	14.27	14.27	14.27	10.81	7.20	3.60	10.70	7.14	3.57
14	5.00	5.00	5.00	3.79	2.53	1.26	3.75	2.50	1.25
15	2.34	2.34	2.34	1.77	1.18	0.59	1.76	1.17	0.59
16	6.97	6.97	6.97	5.28	3.52	1.76	5.22	3.48	1.74
17	2.60	2.60	2.60	1.97	1.31	0.66	1.95	1.30	0.65
18	5.02	5.02	5.02	3.80	2.54	1.27	3.77	2.51	1.26
19	6.30	6.30	6.30	4.77	3.18	1.59	4.73	3.15	1.58
20	8.99	8.99	8.99	6.81	4.54	2.27	6.74	4.50	2.25
21	4.26	4.26	4.26	3.22	2.15	1.07	3.19	2.13	1.06
22	7.32	7.32	7.32	5.54	3.70	1.85	5.49	3.66	1.83
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	5.28	5.28	5.28	4.00	2.66	1.33	3.96	2.64	1.32
27	5.89	5.89	5.89	4.46	2.97	1.49	4.42	2.94	1.47
28	9.25	9.25	9.25	7.00	4.67	2.33	6.93	4.62	2.31
29	4.44	4.44	4.44	3.36	2.24	1.12	3.33	2.22	1.11
30	1.24	1.24	1.24	0.94	0.63	0.31	0.93	0.62	0.31
31	0.91	0.91	0.91	0.69	0.46	0.23	0.68	0.46	0.23
32	3.89	3.89	3.89	2.95	1.97	0.98	2.92	1.95	0.97
33	1.45	1.45	1.45	1.10	0.73	0.37	1.09	0.73	0.36
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla C.5.- Potencial de Biogás de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 2.

Potencial de biogás(m³/día)					
SEMANA	RA	AR	25%	50%	75%
1	0.4711	0.0236	1.2449	0.7697	0.5852
2	1.9748	0.1084	5.0394	3.2795	2.4645
3	3.6910	0.2985	8.3156	5.7296	4.4568
4	3.6104	0.2601	8.4442	5.7480	4.4546
5	5.4967	0.3392	13.5469	9.0411	6.8208
6	4.9929	0.3525	11.7815	7.8915	6.0653
7	3.5391	0.2326	8.6384	5.7734	4.4299
8	1.2519	0.0793	3.0743	2.0493	1.5581
9	2.4463	0.1328	6.1464	4.0309	3.0080
10	2.4579	0.1218	6.3703	4.1036	3.0701
11	4.4003	0.2349	11.4602	7.4173	5.5436
12	2.5037	0.1690	6.0451	4.0132	3.1486
13	4.7584	0.2973	11.7921	7.8568	5.9573
14	1.7064	0.0986	4.3833	2.8704	2.1622
15	0.8028	0.0455	2.0040	1.3132	0.9940
16	2.3361	0.1482	5.7033	3.8298	2.9266
17	0.8974	0.0594	2.1640	1.4544	1.1174
18	1.6661	0.0965	4.2562	2.7754	2.0937
19	2.1729	0.1093	5.6660	3.6067	2.6526
20	3.0722	0.1559	7.9914	5.1559	3.8290
21	1.4083	0.0720	3.8166	2.4088	1.7733
22	2.4840	0.1000	6.8462	4.2833	3.1410
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	1.7828	0.1207	4.2069	2.8350	2.1822
27	1.9855	0.1005	5.1097	3.3114	2.4783
28	3.1824	0.1750	8.0024	5.2425	3.9525
29	1.4617	0.0889	3.5441	2.3637	1.8021
30	0.4395	0.0196	1.1821	0.7485	0.5530
31	0.2805	0.0191	0.6385	0.4403	0.3418
32	1.3251	0.0659	3.4496	2.2207	1.6570
33	0.4480	0.0259	1.1001	0.7300	0.5541
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla C.6.- Potencial de Metano de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 2.

Potencial de Metano (m³/día)					
SEMANA	RA	AR	25%	50%	75%
1	0.3062	0.0154	0.8092	0.5003	0.3804
2	1.2836	0.0705	3.2756	2.1317	1.6019
3	2.3992	0.1941	5.4052	3.7243	2.8969
4	2.3468	0.1691	5.4887	3.7362	2.8955
5	3.5728	0.2205	8.8055	5.8767	4.4336
6	3.2454	0.2291	7.6580	5.1295	3.9425
7	2.3004	0.1512	5.6149	3.7527	2.8794
8	0.8137	0.0516	1.9983	1.3320	1.0128
9	1.5901	0.0863	3.9952	2.6201	1.9552
10	1.5976	0.0792	4.1407	2.6673	1.9956
11	2.8602	0.1527	7.4491	4.8212	3.6033
12	1.6274	0.1099	3.9293	2.6086	2.0466
13	3.0930	0.1932	7.6649	5.1069	3.8722
14	1.1092	0.0641	2.8492	1.8657	1.4054
15	0.5218	0.0296	1.3026	0.8536	0.6461
16	1.5185	0.0963	3.7071	2.4894	1.9023
17	0.5833	0.0386	1.4066	0.9454	0.7263
18	1.0829	0.0627	2.7666	1.8040	1.3609
19	1.4124	0.0710	3.6829	2.3443	1.7242
20	1.9969	0.1013	5.1944	3.3514	2.4889
21	0.9154	0.0468	2.4808	1.5657	1.1526
22	1.6146	0.0650	4.4501	2.7842	2.0417
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	1.1588	0.0785	2.7345	1.8428	1.4184
27	1.2906	0.0653	3.3213	2.1524	1.6109
28	2.0686	0.1138	5.2016	3.4076	2.5691
29	0.9501	0.0578	2.3037	1.5364	1.1713
30	0.2856	0.0127	0.7684	0.4865	0.3595
31	0.1823	0.0124	0.4150	0.2862	0.2222
32	0.8613	0.0428	2.2422	1.4435	1.0770
33	0.2912	0.0168	0.7150	0.4745	0.3602
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla C.7.- Potencial Energético de los RA, AR y sus respectivas co-digestiones Caso 2.

Potencial Energético (kWh/día)					
SEMANA	RA	AR	25%	50%	75%
1	9.7356	0.4886	25.7274	15.9069	12.0937
2	40.8104	2.2407	104.1425	67.7736	50.9307
3	76.2775	6.1697	171.8488	118.4071	92.1034
4	74.6118	5.3756	174.5056	118.7864	92.0585
5	113.5925	7.0095	279.9568	186.8414	140.9580
6	103.1827	7.2854	243.4728	163.0830	125.3448
7	73.1383	4.8067	178.5184	119.3108	91.5463
8	25.8709	1.6394	63.5320	42.3497	32.1992
9	50.5547	2.7448	127.0210	83.3012	62.1618
10	50.7939	2.5181	131.6469	84.8035	63.4468
11	90.9352	4.8551	236.8341	153.2832	114.5625
12	51.7409	3.4928	124.9274	82.9365	65.0686
13	98.3358	6.1438	243.6936	162.3673	123.1113
14	35.2641	2.0368	90.5845	59.3180	44.6835
15	16.5907	0.9403	41.4142	27.1376	20.5421
16	48.2777	3.0629	117.8621	79.1453	60.4797
17	18.5447	1.2284	44.7217	30.0561	23.0917
18	34.4304	1.9941	87.9583	57.3557	43.2681
19	44.9044	2.2581	117.0917	74.5343	54.8189
20	63.4884	3.2209	165.1486	106.5513	79.1299
21	29.1035	1.4878	78.8727	49.7793	36.6466
22	51.3334	2.0671	141.4829	88.5182	64.9114
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	36.8419	2.4953	86.9382	58.5881	45.0974
27	41.0311	2.0770	105.5958	68.4334	51.2155
28	65.7666	3.6173	165.3758	108.3393	81.6817
29	30.2081	1.8378	73.2422	48.8472	37.2408
30	9.0816	0.4049	24.4299	15.4683	11.4283
31	5.7962	0.3940	13.1947	9.1000	7.0637
32	27.3852	1.3619	71.2884	45.8926	34.2423
33	9.2592	0.5344	22.7337	15.0860	11.4510
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla C.8.- Equivalencias de masa y volumen de los residuos Caso 2.

SEMANA	Mezcla kg/día			Litros de Aguas Residuales (L)			Kilogramos de Aguas Residuales (kg)		
	1:3	1:1	3:1	1:3	1:1	3:1	25% (1:3)	50% (1:1)	75% (3:1)
1	5.54	2.77	1.85	4.20	1.40	0.47	4.16	1.39	0.46
2	23.02	11.51	7.67	17.43	5.81	1.94	17.26	5.75	1.92
3	43.38	21.69	14.46	32.85	10.95	3.65	32.54	10.85	3.62
4	42.61	21.30	14.20	32.26	10.75	3.58	31.96	10.65	3.55
5	64.34	32.17	21.45	48.72	16.24	5.41	48.26	16.09	5.36
6	58.37	29.18	19.46	44.20	14.73	4.91	43.78	14.59	4.86
7	41.92	20.96	13.97	31.74	10.58	3.53	31.44	10.48	3.49
8	15.23	7.61	5.08	11.53	3.84	1.28	11.42	3.81	1.27
9	28.83	14.41	9.61	21.83	7.28	2.43	21.62	7.21	2.40
10	29.28	14.64	9.76	22.17	7.39	2.46	21.96	7.32	2.44
11	51.94	25.97	17.31	39.33	13.11	4.37	38.95	12.98	4.33
12	29.86	14.93	9.95	22.61	7.54	2.51	22.39	7.46	2.49
13	57.08	28.54	19.03	43.22	14.41	4.80	42.81	14.27	4.76
14	20.01	10.01	6.67	15.16	5.05	1.68	15.01	5.00	1.67
15	9.36	4.68	3.12	7.09	2.36	0.79	7.02	2.34	0.78
16	27.87	13.93	9.29	21.10	7.03	2.34	20.90	6.97	2.32
17	10.42	5.21	3.47	7.89	2.63	0.88	7.81	2.60	0.87
18	20.09	10.05	6.70	15.21	5.07	1.69	15.07	5.02	1.67
19	25.22	12.61	8.41	19.09	6.36	2.12	18.91	6.30	2.10
20	35.97	17.98	11.99	27.23	9.08	3.03	26.97	8.99	3.00
21	17.03	8.52	5.68	12.90	4.30	1.43	12.77	4.26	1.42
22	29.28	14.64	9.76	22.17	7.39	2.46	21.96	7.32	2.44
23	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
24	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
25	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
26	21.11	10.56	7.04	15.98	5.33	1.78	15.83	5.28	1.76
27	23.56	11.78	7.85	17.84	5.95	1.98	17.67	5.89	1.96
28	36.99	18.49	12.33	28.01	9.34	3.11	27.74	9.25	3.08
29	17.77	8.88	5.92	13.45	4.48	1.49	13.32	4.44	1.48
30	4.96	2.48	1.65	3.76	1.25	0.42	3.72	1.24	0.41
31	3.64	1.82	1.21	2.76	0.92	0.31	2.73	0.91	0.30
32	15.57	7.79	5.19	11.79	3.93	1.31	11.68	3.89	1.30
33	5.80	2.90	1.93	4.39	1.46	0.49	4.35	1.45	0.48
34	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R