

Esquema de bioeconomía circular. Gráfica comparativa de la intensidad de carbón de gasolina contra el etanol. Reutilización de los desechos de la granja y diferentes métodos para generar energía y proteína unicelular. Mejora la calidad del aire y el agua con el reciclaje.

INTRODUCCIÓN

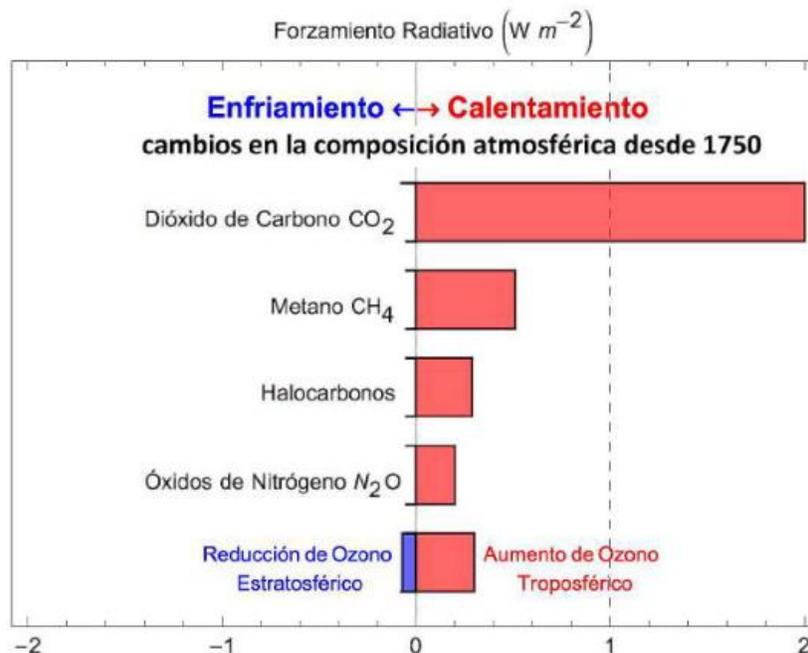
La producción de gas metano (CH_4) existe de forma natural por millones de años formando grandes yacimientos de hidrocarburos junto a reservorios petrolíferos y gas helio; acumulándose por miles de siglos en grandes cantidades atrapadas en las profundidades de la tierra, los océanos, las capas de hielo permanente y humedales. Su origen es biológico al ser producido metabólicamente por microorganismos y plantas unicelulares metanogénicas que utilizan el CO_2 , metilo (CH_3) u otras sustancias orgánicas para sintetizar CH_4 . La metanogénesis es el metabolismo o respiración anaeróbica de metanobacterias bajo condiciones mesofílicas con temperaturas superiores a los 20°C que en 20 minutos doblan su población a los 45°C . Se reduce la tasa de producir amoníaco a los 16°C o menores. Su desarrollo y crecimiento se ve limitado en presencia de O_2 , NO_3 , Fe^3 , SO_4 , e inhibido al incrementarse los ácidos grasos volátiles por arriba de 10 gr/L Wang 2019. Para la metanogénesis le favorece un medio de cultivo concentrado con H_2 , CO_2 , formatos, acetatos CH_3 . Su extracción y compresión lo hacen un combustible y reactivo químico de alta demanda industrial, urbana y comercial. Buzinaro 2013 resalta que una tonelada de gas metano es equivalente a la eliminación de 21 toneladas de grafito.

Su equilibrio en la naturaleza es minimizado con la participación de microorganismos metanotróficos aeróbicos (Gammaproteobacteria, Alphaproteobacteria, Verrucomicrobia) y con mayor potencial económico los anaeróbicos (**Methylovumicrobia buryatense**, Methylovumicrobia alcaliphium, Methylococcus capsulatus, M. trichospora) que oxidan el $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2$ y lo convierten en productos como $\rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. W.methanotrop.org. Ochoa 2022 reporta para un reactor porcino anaeróbico en Sonora la abundancia de Methanosaeta y en la fase aeróbica Syntrophobacter. Muchos microorganismos están presentes en el reactor, pero no todos biológicamente activos. En ello con mucho

contribuyen los océanos como sumideros de CO_2 , pero si se daña la estabilidad de los 7 mares se revertirán como expulsos masivos de gases.

La característica física menos deseada del gas metano es que se está acumulando en la atmósfera y tiene una propiedad de refracción de la luz solar 50 veces más alta que el CO_2 , ocasionando un incremento en la tasa del calentamiento atmosférico, el cual deshiela grandes capas de la tierra que van liberando metano atrapado en los glaciares. Se genera un círculo decadente de contaminación que no se puede parar.

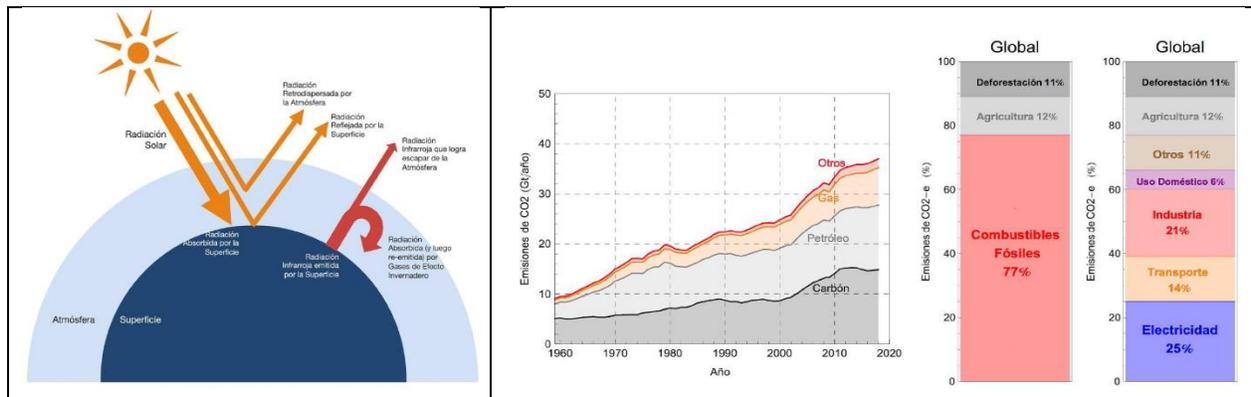
Estudios indican que los gases de la atmósfera como el bióxido de carbono CO_2 persisten en la naturaleza por mil años y el metano tiene una vida corta de 12 años, el óxido nitroso N_2O dura más de 100 años y es el tercer gas causante de un efecto de invernadero GEI, como de la eutrofización de los mares. Otros gases de vida larga son sulfato de hexafluoruro (SF_6), varios clorofluorocarbonos y ozono O_3 situado a grandes alturas en las capas de la atmósfera. El metano no es el único gas que ocasiona calor por la refracción solar provocando un efecto de invernadero global. Por mencionar su valor en calentamiento de la atmosfera CO_2 :1, CH_4 : 30, NO_2 :270, clorofluorocarbonos CFC: 5000. La disminución frontal directa sobre los emisores de CH_4 como iluminación, transporte, acondicionar el ambiente de edificios (frío-calor), energía industrial, etc. es la clave para minimizar el impacto ambiental que causan los humanos en el mundo.



Forzamiento radioativo atmosférico por los principales GEI desde 1750.

La Organización de las Naciones Unidas con la presencia de 197 países reconocieron por conferencia de las partes (COP) el 21 de marzo 1994, problemas antropocéntricos del calentamiento mundial. Anteriormente en los 60's los estudios señalaban el incremento de smog en el aire, luego en los 70's se resalta el impacto negativo de la lluvia ácida,

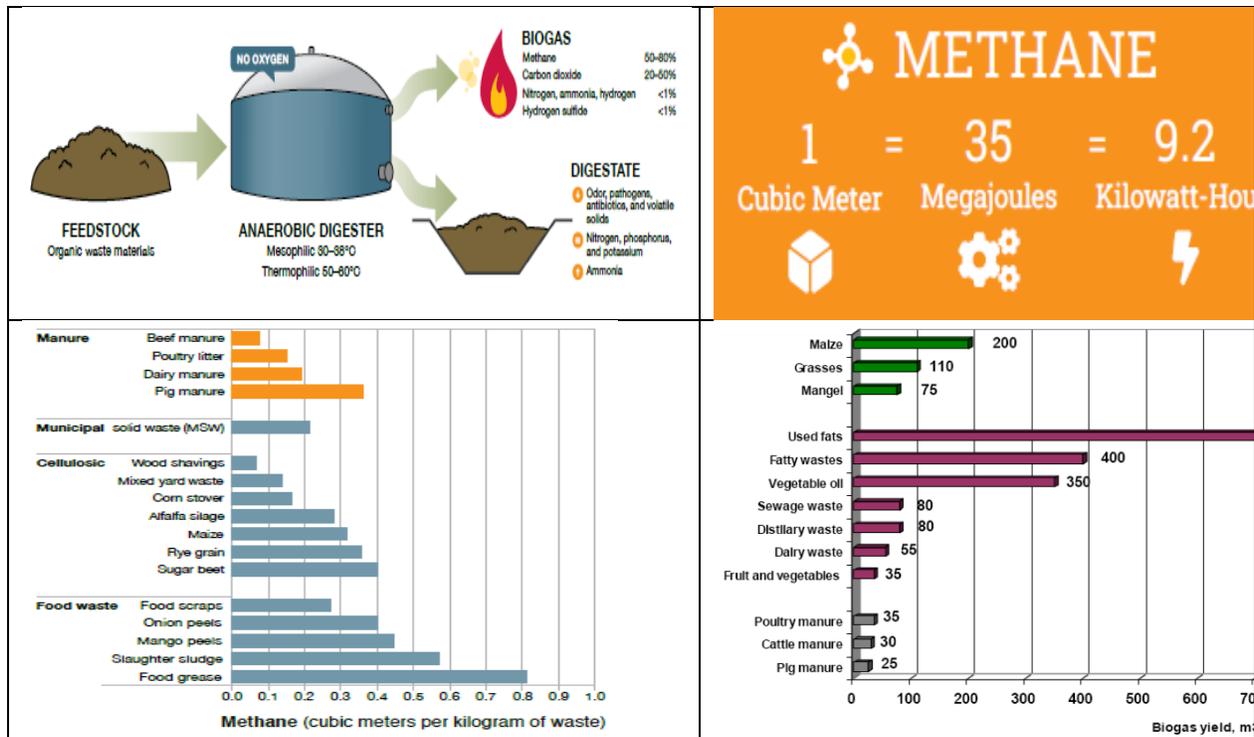
principalmente en ciudades con desarrollo industrial. El protocolo de Kioto se adoptó en 1997 y se forzó su aplicación mundial en 2005. La Conferencia sobre cambio climático 2021, o COP26 reunió 110 países de la ONU en Glasgow del Reino Unido, con el compromiso de reducir las emisiones antropocéntricas en 30% para el año 2030. La FAO cuantifica información mundial expresada en gigatoneladas de bióxido de carbono equivalentes CO₂eq. Si es un mundo de contaminantes atmosféricos de gases incoloros, no los vemos, pero si sentimos su efecto. Hay buenas gestiones e intenciones mundiales.



En realidad, es poco lo que se ha avanzado con el desafío ambiental para alcanzar un efecto cuantificable de miles de toneladas, no es una misión imposible, se puede hacer y lograr. Hay una meta social para evitar un impacto negativo al medio ambiente, es contribución de todos, no les corresponde solo a las potencias económicas y no es política. Es compromiso individual.

Y si el gas CH₄ es relativamente abundante ¿Por qué producirlo en un ambiente controlado? La ONU 2021 resalta; que si bien la minería, industria petrolera y de hidrocarburos, la basura urbana son los mayores aportadores de gases que alteran la composición del aire. La industria agropecuaria hace lo suyo participa activamente para cumplir con la normativa, legislación nacional y acuerdos internacionales que buscan decrecer para el 2030 las emisiones de metano hasta reducirlas comparativamente a las registradas en el 2010, logro que permitirá reducir 1.5°C la temperatura global para el 2050. <https://news.un.org/es/story/2021/05/1491742>.

El factor de emisión porcino es de 6 Kg de CH₄ por cabeza por año, por ello se deben ejecutar proyectos que aporten remedios a la contaminación, de procesos sumatorios a largo plazo y que continúen siendo una fuente alimenticia para la humanidad.



Muchos productos agropecuarios no se deben tirar. Tienen gran potencial energético.

Un estudio de la INECC 2021 señala que México se ha comprometido a realizar inversiones en 35 medidas de mitigación con un potencial cercano a 237 millones de toneladas equivalentes de bióxido de carbono (MtCO₂e) antes del 2030, en la que se incluyen como política pública apoyar económicamente la instalación de biodigestores agropecuarios. El artículo de Vidal 2017 y Claudia Sheinbaum Pardo resaltan que la regulación mexicana debe proceder a reducir el uso de energías fósiles e incrementar tecnologías con bajo impacto ambiental de carbono como empleando biomasa, biogás y otras alternativas para generar electricidad. Sí, se debe invertir en investigación, capacitación y desarrollo para encontrar soluciones tecnológicas.





Motor generador. Compresor de gases, separa impurezas para la combustión y mide la cantidad de metano que se genera para cuantificar los bonos de carbono que se comercializan. Separador de excretas solidas de tornillo. Separador por centrifugación. Figura con coladera inclinada. Coladera de excretas inclinada. Coladera inclinada en V. Coladera con rodillo aplanador.

Avanzar en la certificación de instalaciones y personal de manejo de los reactores anaerobios para producir biogás. Se manejan toneladas de desperdicio y su reciclaje participa protegiendo el aire, agua y suelo. Contribuyen con mucho menor impacto controlando los Gases con Efecto de Invernadero (GEI). Se gana un valor ambiental mundial como económico de forma individual.

Hay opiniones controversiales definiendo las energías naturales, sostenibles, renovables, limpias que liberan menos emisiones de gases que causan un efecto de invernadero. El uso de energía fósil al tiempo provoca cambio climático, incluyendo el gas extraído del subsuelo. Las alternativas del futuro son fuentes propias como la solar o fotovoltaica,

térmica de luz solar, eólica, geotérmica, hidráulica, oceánica (mareomotriz, undimotriz (olas)), biomasa con pirólisis, bioetanol con maíz o yuca, biodiesel con maíz o soya, biogás producido en reactores con el cultivo de biológicos, uso eficiente de carbón-grafito, gas natural.

Múltiples tecnologías nuevas como sintetizar metano o metanol a partir del bióxido de carbono expedido en la combustión de calderas eléctricas usando como energía la luz solar, también el uso de hidrógeno reformado del metano producido en los reactores porcinos, muchas todavía experimentales, se están creando para hacer uso de energía limpia y así los países puedan cumplir la meta de no tener emisiones negativas.





Energías renovables como eólica, fotovoltaica, calorífica por iluminación solar, potencial hidráulico, biomasa, biodiesel y etanol, oceánica, geotérmica.

Para algunos países la fisión o energía nuclear se clasifica como energía verde, 5 gramos de uranio nuclear U producen energía como 1000 kilos de carbón mineral o grafito. La nueva generación de reactores nucleares es de menor tamaño y alta eficiencia, campo para la inversión privada-estado. El proceso en el sitio del generador, puede ser energía limpia si considera la extracción de los minerales en otros países, donde se registra el daño ecológico el GEI y allá queda la contaminación, lejos del reactor nuclear. Los residuos radioactivos ahora son reciclables.

En EUA hay 54 plantas nucleares, 94 reactores compactos del sector privado. Francia 56, China 54, etc., Brasil, Argentina; y México en Laguna Verde, Veracruz. En el estado de Sonora, por los 80's se estableció una oficina de Uramex. Se hicieron miles de perforaciones muy profundas, dejando cacarizo el Estado y sin reportes públicos. A mi entender, ni agua encontraron. Pero los hallazgos potenciales no se dieron a conocer.

El litio, hoy en boga de extracción y transformación, es un mineral propio para baterías, menos adecuado para generación de energía. Se recicla bien y ahí radica su benevolencia.

Con tantas alternativas tecnológicas, cabe la pregunta si hay necesidad y conveniencia económica y ambiental de producir y capturar gas metano por medio de excretas de granja en un medio controlado anaeróbico artificial, de alto costo de inversión, pero que constituye un alto impacto de mitigación en la producción de alimentos de vida sana, empleando microorganismos que en su metabolismo van a formar estas moléculas de CH₄ como biocombustible.

Si el estiércol colectado de los animales se tira libremente a la tierra agrícola como abono orgánico y mejorador del suelo, al tiempo de su descomposición microbiana se formará CO₂. Si se usan embalses de almacenamiento en lagunas aeróbicas, sin cubierta o con aireadores artificiales (oxigenadores) para reducir los olores, mucho del gas formado entrará libre a la atmósfera contribuyendo al aporte de gases con efecto de invernadero.

Desde antaño se ha usado una tecnología simple colectando y separando sólidos de excretas de animales para reducir la cría de moscas, olores fétidos y aprovechar las boñigas incorporándolas a las tierras de cultivo. Sin éxito por fallas de manejo, las

excretas porcinas no han resultado ideales para su transporte, tampoco como insumo en la dieta al presentarse ciclos de toxicidad para ser un subproducto económicamente viable en la alimentación de rumiantes, ya que con frecuencia se reportan prolapsos rectales en lotes de engorda de bovinos. Si en la laguna de oxidación, la superficie del espejo de agua forma espuma es indicativo de ser un estanque biológicamente activo con menos ácidos grasos volátiles fétidos, pero con mayor generación de gas metano. La costra formada se puede encender, si no hay prácticas de manejo adecuadas.



La gran aportación de instalar reactores anaeróbicos en establos, corrales, granjas, rastros, agroindustrias u otros y con tan solo al controlar el biogás producido por las granjas del mundo, aprovechando la generación de energía y reciclando los desechos de aguas y orgánicos, se estima que bajará el calentamiento global -0.5°C en la próxima década. ¿Vale la pena su instalación y aprovechamiento masivo?

Se requiere la aplicación combinada de nuevas tecnologías como biorreactores anaeróbicos continuos de alta velocidad o reactores anaeróbicos discontinuos, para el tratamiento de efluentes porcinos generando biogás controlado para producir calor y generar electricidad. Se debe valorar la biomasa residual participando en la economía verde, no es solo un desperdicio que causa costos, multas, espacio inútil de superficie. Hay reportes alentadores de investigación microbiológica que, introduciendo la aplicación adicional de inóculos como bacterias, enzimas, otros sustratos como los residuos de los empaques de frutas y hortalizas, hacen el sistema de conversión de materia orgánica a gas energético, más eficiente, se reduce la contribución en la huella de carbono. De ser posible hacer ajustes en la relación Carbono/Nitrógeno C/N y agregar más agua reciclada al medio de cultivo.



Flotación de aire para separar líquidos de sólidos. Tratamiento de aguas casi potable. Ultrafiltración. Super filtrado con ósmosis inversa.

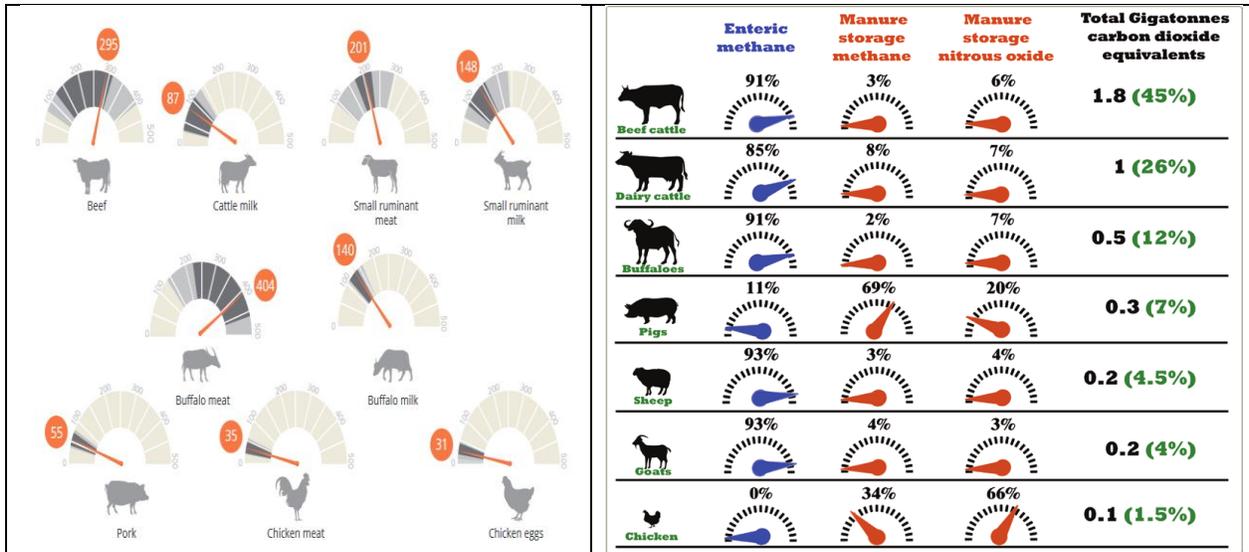
Las desventajas aparte de los costos de construcción e instalación, son el mantenimiento periódico ya que muchas lagunas anaeróbicas se descuidan y abandonan a los 5 años, con posibles explosiones para fugas no vigiladas. 1 MW de energía producida requiere de 300 Ha de cultivo para alimentar animales de granja, la fibra bruta limita la acción metabólica bacteriana y microbiana para producir gas metano. La bolsa almacena el biometano, pero también debe tener capacidad para otros gases CO_2 , H_2S , H_2O , N , O_2 , NH_3 , siloxan, éstos tienen bajo valor calorífico y gran poder corrosivo para el generador.

IMPLICACIONES SOCIALES DE LOS BIOREACTORES Y SU PROBLEMÁTICA

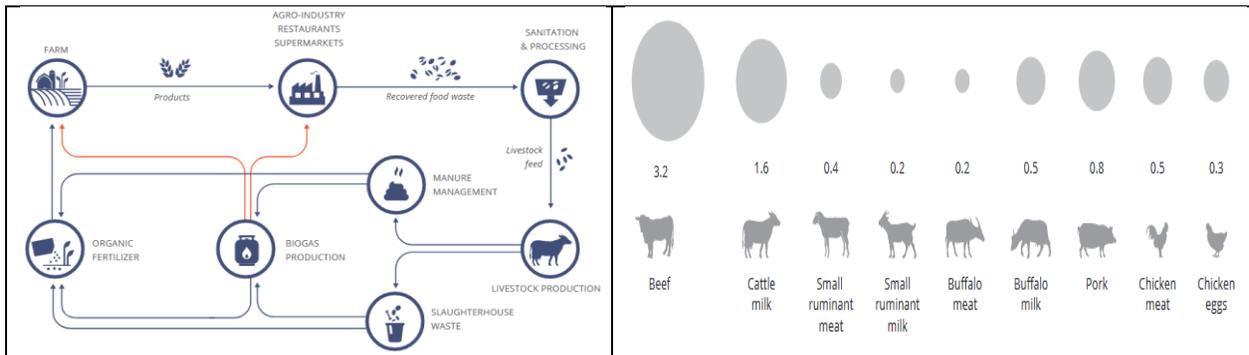
La producción de alimentos es esencial para la vida y el desarrollo de las actividades sociales y laborales. Los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS 2) es tener hambre cero a nivel mundial. La humanidad sedentaria y en la actualidad muy urbana, compite con la vida silvestre y doméstica en el uso de recursos naturales; utilizando espacio, agua, energía e insumos, alterando los ciclos biológicos establecidos. Para el futuro se predice un mundo urbano integrado a las granjas de ambiente controlado. No habrá distancia de separación entre uno y el otro sistema de vivienda y de producción. Ambos fusionados.

La carne de cerdo alcanza el mayor consumo per cápita mundial, por lo que su preferencia del consumidor alienta la inversión a nuevas instalaciones porcinas. El crecimiento en la demanda al consumo de proteína animal debe ir acompañada de medidas tecnológicas que reduzcan fuertemente el impacto ambiental para la producción

de alimentos. Para producir un kilo de proteína con carne de res se han emitido 295 Kg de CO₂ equivalente, para carne de búfalo de agua 404, carne de ovino 201, cabrito 148, leche de búfalo 140. Para 1 kilo de proteína de leche de establo 87, con cerdo 55, pollo 35, para el huevo 31 Kg de CO₂ eq.



Gigatoneladas de carbón equivalente para cada especie animal.



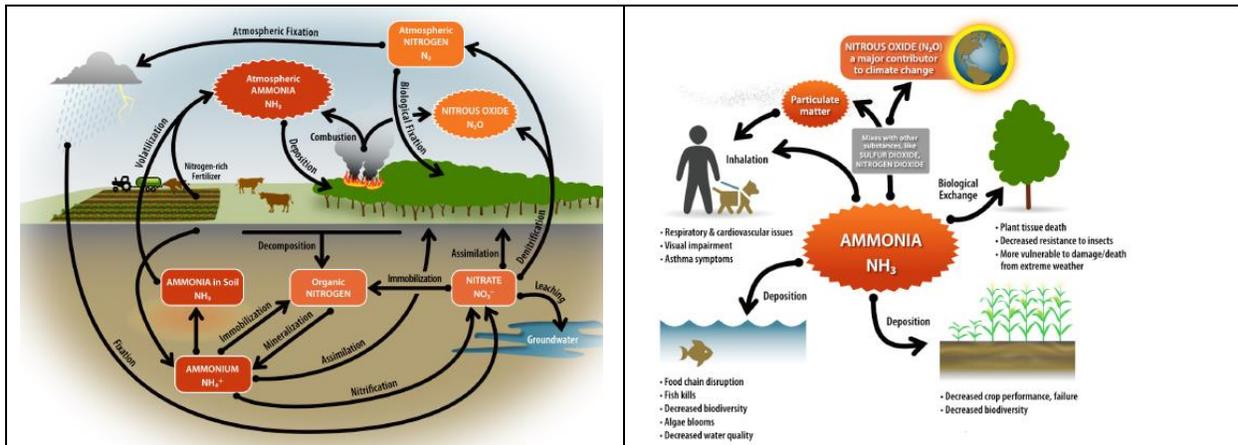
Insertando una cadena productiva de economía circular las emisiones se neutralizan.

En México la necesidad de neutralizar las emisiones y contaminantes ambientales no es la excepción ya que existe un gusto culinario por los guisos con carne de cerdo y su demanda genera una sobre demanda, por lo que se tienen que importar anualmente 1.5 millones de toneladas de carne y para reducir la salida de divisas se alienta la creación de mayores granjas altamente tecnificadas y financieramente rentables. De esta manera las granjas porcinas por su crecimiento poblacional generan contaminantes y no solo por decir gas metano entérico regurgitado, CO₂ por la respiración de los animales, sino por la descomposición de los desechos y excretas que se producen diariamente.

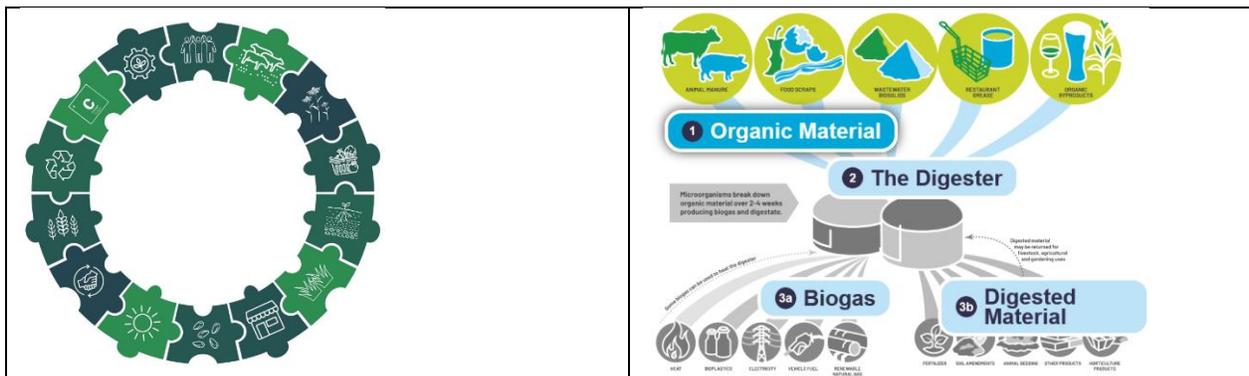
En el caso de las granjas porcinas un impacto negativo en el mal manejo de los excrementos genera malos olores amoníaco (NH₃), ácido sulfhídrico (H₂S) y monóxido de carbono CO. Su acumulación de materia orgánica reacciona produciendo compuestos orgánicos volátiles como fenólicos y ácidos grasos volátiles; así como los gases con

efecto de invernadero: bióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄), óxido nitroso N₂O, nitritos NO₂, nitratos NO₃, NO₄ y otros olores.

El amonio NH₃ es un gas sin color y se libera con la descomposición de la materia orgánica. Es parte del ciclo del nitrógeno y las granjas como prácticas agrícolas contribuyen a las emisiones de nitrógeno a la atmósfera



Para minimizar estas reacciones químicas se debe implementar un manejo técnico planificado de las excretas. Cada unidad de producción porcina desea alcanzar progresivamente la neutralidad de las emisiones de gases con efecto de invernadero. No desean recibir el mote de marranos o puercos sucios. Para ello los poricultores implementan mejores prácticas sostenibles de manejo zootécnico con los animales y tecnologías de innovación en la infraestructura, integrando nutrición, alimentos, insumos, bienestar animal, manejo ambiental, instalaciones, reciclaje y economías varias logran reducir malos olores y hacen un aprovechamiento circular de los desechos y excretas. Todo lo del cerdo se aprovecha eficientemente. Todo en miras de una sola salud.

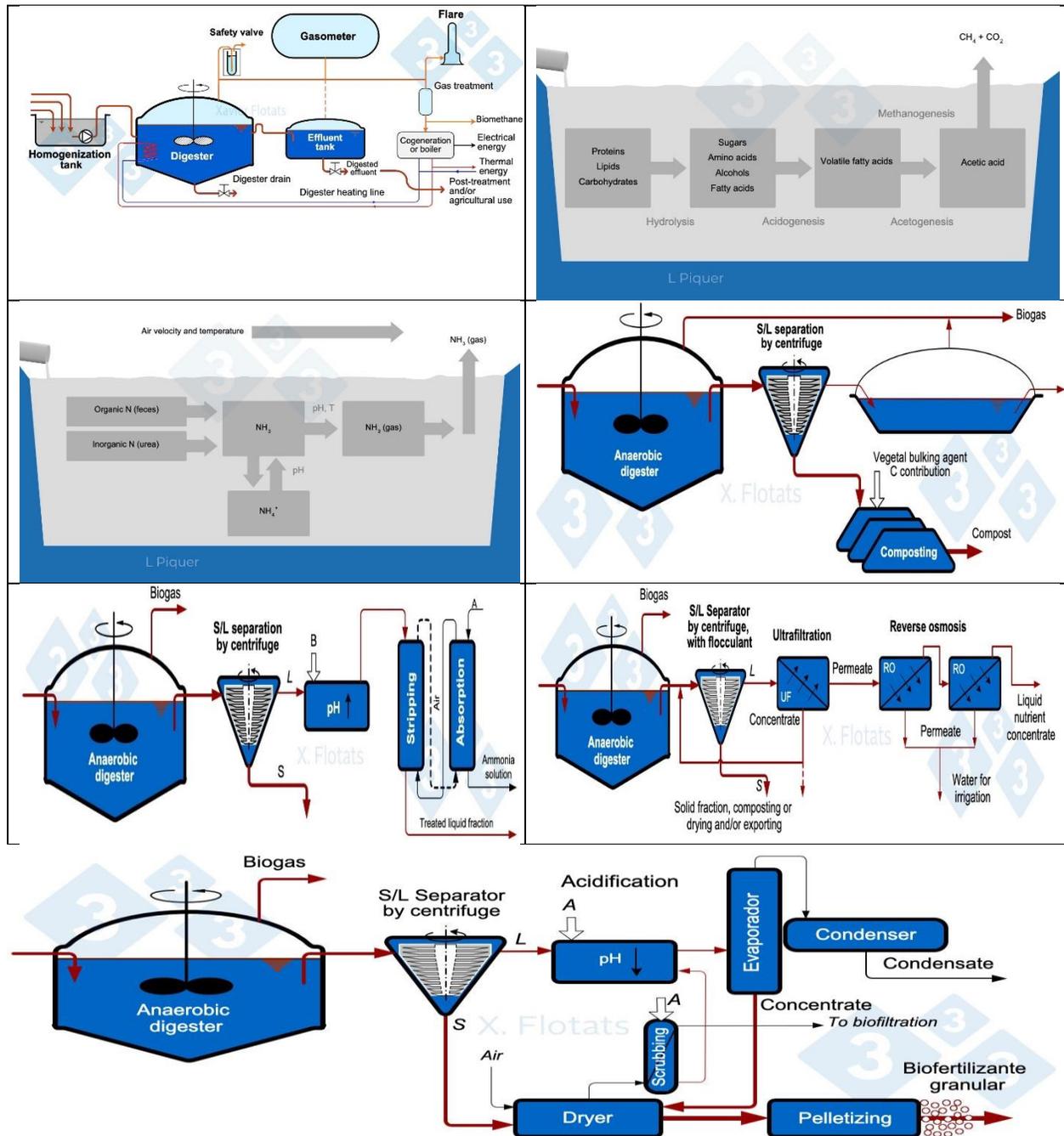


Economía circular. Integrar desperdicios para generar bienes de consumo.

La industria porcícola participa capturando bajo control estos desechos sólidos y gases para reducir sus emisiones libres, busca secuestrar carbono abonando el subsuelo, reciclar las aguas de la limpieza de la granja y usarla para el riego agrícola. Implementa

alternativas de paneles solares fotovoltaicos, postes eólicos, reforestación perimetral como rompevientos.

La producción de carne de cerdo de vida sana no está libre de contaminantes, pero existen tecnologías y prácticas de manejo zootécnico que harán la producción de alimentos con niveles neutros de contaminantes. Hay que elegir una opción.



Flujo del proceso de excretas hasta obtener electricidad. Reacciones químicas metanogénicas en el biorreactor. Liberación de NH_3 de un biodigestor abierto. Proceso combinado de composta orgánica y producción de CH_4 . Tratamiento para separar

fertilizante nitrogenado y agua limpia. Procesado de subproductos separados por membrana. Fertilizante granular comprimido o pellet.

ANTECEDENTES

PORCICULTURA MUNDIAL: La carne de cerdo es la proteína animal más consumida a nivel mundial, se festeja el 15 de marzo el día mundial del cerdo. En abril 2024, el Senado de México constituyó el día del porcicultor también para el 15 de marzo. Si bien hay culturas que prohíben el consumo de carne de cerdo y muchos países socialmente no aceptan su ingesta como alimento humano. La preparación de carnitas es muy popular en el mundo, de ahí la gran demanda por consumir carne de cerdo.

Durante los 70s en los EUA a lo largo de la costa del Pacífico y posiblemente en otros lugares se construyeron pilas herméticas de concreto armado con varilla y hormigón para reducir los contaminantes que generaban las granjas porcinas. En un proceso anaerobio se generaba gas metano de manera muy eficiente, los sedimentos sobrantes eran sólidos y minerales no digeridos por la flora microbiana de fermentación y así los líquidos sobrantes salían como desechos de bajo impacto ambiental. La limitante de este diseño de hormigón es que la capacidad de almacenamiento del búnker tan solo capturaba 3 días de colecta de efluentes de la granja, mientras se cerraba el biorreactor anaerobio por 23 días para el proceso de degradación y 4 días de limpieza. De esta manera durante los 27 días del mes las excretas de los cerdos seguían fluyendo libremente por un lado del reactor, como desechos contaminantes sin tratamiento. Su contribución al impacto de reducir la contaminación realmente era bajo, aunado a su alto costo de construcción y mantenimiento. El principio de fermentación estaba bien aplicado, solo limitado al costo de varillas y cemento.

El entrar al mercado las geomembranas, en 1985, el diseño modular de una sola laguna de gran capacidad de retención de excretas, primero solo cubriendo el fondo y talud para reducir infiltración al subsuelo que afectara los pozos. Segundo, a las lagunas se les incorporó el aireador, se redujo el mal olor, pero los gases salían libres a la atmósfera. Tercero se incorpora la cubierta flotante para capturar el gas bajo control y ahora su almacenamiento del agua de salida tiene sus ventajas al disminuir contaminación de la carga orgánica constante, se obtiene biogás con potencial energético, las aguas de desecho son susceptibles de reutilización para la agricultura y se reduce la carga patogénica del estiércol al morir los huevos de helmintos, disminuye la carga de bacterias Coliformes para ser empleado como abono agrícola. Suárez 2015.



Aireador de laguna abierta. Biorreactores en Brasil. Biogás en Veracruz, México. Otras lagunas anaeróbicas para capturar gas metano producido.

Hoy en día la tecnología zoonosanitaria, manejo de instalaciones y equipo de automatización permiten la alta concentración de animales en un solo lugar. En Texas EUA, en un área de 800 hectáreas y a poca distancia entre ellas se establecieron en forma separada 6 granjas de 3,000 vientres cada una, con unidades de destete y naves de finalización, junto con la planta de alimentos balanceados.

Las nuevas granjas 2020 en adelante, tienen capacidad para 5,000 y hasta 10,000 vientres reproductores en una sola unidad de producción.

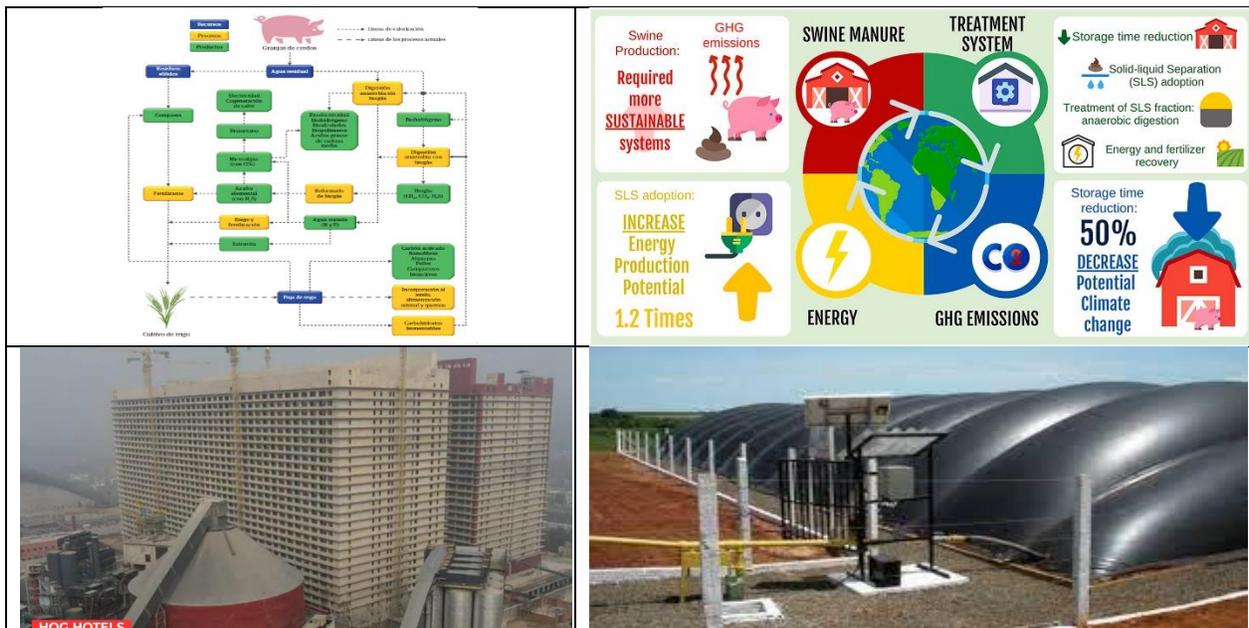
La mayoría de los 250 biorreactores anaeróbicos instalados en EUA son de establos lecheros y poco se ha incursionado con los porcicultores debido a explosiones en Wisconsin. En Europa se ha avanzado mucho en disminuir la huella de carbono instalando 13,000 biorreactores y tan solo en Alemania existen funcionando 10,000 unidades.

España cuenta con un inventario nacional de 34 millones de porcinos, generó un sacrificio de 56 millones de cerdos en el año 2020, ahora se instalan granjas porcinas sitio uno (S1) con 10,000 vientres. Las crías destetadas se colocan a distancia del S1, en granjas diseñadas de ambiente controlado artificialmente para reducir la mortalidad de los lechones, son granjas (s2). Las granjas de finalización o engorda (S3) son las de mayor volumen en el consumo de alimento. Para el 2025 se concluirán los trabajos de una planta que procesará 180,000 toneladas de cerdaza al año. El ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (MITECO) maneja un programa amplio para capacitación de profesionistas ambientales y apoyen la creación de trabajos verdes. Participan en los

mercados de desechos y las emisiones que causan, comercio de subastas, registros, bonos, autorizaciones, asignaciones, metodologías aprobadas, solicitudes.

El consumo de carne en Francia tiene preferencia las carnes frías de cerdo con 30.60 Kg por habitante al año, seguida por el precio de ave con 29.50Kg per cápita y la tradición de la carne de res con 21.30 kilos/Hab/año.

En China desde el 2020, en apoyo a las compañías constructoras, se están construyendo edificios de 10-20 pisos, como granjas porcinas verticales. Todo en pocas hectáreas, con clima controlado artificialmente, para concentrar más de 500,000 animales en cada unidad de producción, en la que incluyen elevadores con capacidad para 20 personas y con ello poder subir y bajar insumos, animales y personal laboral.



Los insumos alimenticios para los animales convertidos en excremento son reciclados como un nuevo insumo para generar bienes y servicios. La separación cribada de los sólidos de las excretas son materia prima para abonos orgánicos. Los hoteles en China para granjas porcinas. Biorreactores en Brasil generando biogás.

La propuesta de instalar módulos en batería con reactores anaeróbicos individuales en secuencia, como la hace la industria cervecera fue expuesta en Iowa, EUA en el 2002 y en Texas en el 2010, pero las condiciones nacionales no eran favorables para este tipo de proyectos. La alternativa se expuso en Sonora, México a la empresa AgCert en el 2004, sin eco favorable en la respuesta.

Pero el proselitismo persiste para cuidar la naturaleza creada por Dios. Todos vivimos en un mismo planeta, solo cambian las leyes y actores. No hay un solo frente con fórmulas o reglamentos únicos para resolver la problemática de los GEI. Para ello en diferentes artículos Feuchter 2023, 2022, 2018 ha sostenido que el CH4 entérico se acumula en la atmósfera por alrededor de 10 años mientras los relámpagos lo convierten en CO₂; promueve las prácticas de manejo para reducir el impacto ambiental por cada kilo de

proteína producido y comercializado; se modifican estratégicamente las instalaciones; resalta que en Qatar se produce proteína bacteriana unicelular mediante fermentación generando metano; en México se genera gas metano con el cultivo de nopal; composteo de los animales muertos sin cremación; comprimir el gas con efecto de invernadero para encender motogeneradores que transformen el CH₄ en electricidad; recomendar la aplicación inyectada al suelo incorporando las excretas con cincel para retener la volatilidad del óxido nitroso N₂O previo al cultivo de la tierra de siembra; lo importante es el aporte del abono de carbón como alimento para la vida microbiana del suelo y la contribución en mejorar la porosidad para retener agua de riego en el suelo agrícola y no el valor en sí del contenido de fertilizante.

Actualmente 2024 se están desarrollando proyectos con sofisticaciones tecnológicas a detalle de los procesos biológicos de fermentación y mejorando la eficiencia de la captura y combustión del gas metano producido. Una cámara puede contener en rango de gas metano CH₄ 50-70% según clima, tipo de excretas, manejo y de CO₂ entre 30-50%. Un compresor de gases puede separar el CO₂ y otros gases para alcanzar una combustión más pura y sin gases corrosivos en el motor.

PORCICULTURA NACIONAL EN MÉXICO: A partir de los 70s se inicia el desarrollo de la porcicultura estabulada con granjas de 150 vientres como punto de equilibrio financiero, para 1975 se necesitaban instalaciones para 250 hembras con corrales de desarrollo y engorda incluidos ya que el período de lactación era hasta de 35-42 días, en los 80s el análisis de factibilidad financiera requería establecimientos para 450 marranas y lactancias de 21 días, en 1985 ya era de 500 reproductoras y lactancias de 16 días, aunque desde temprano el punto de equilibrio financiero no era la limitante desde el surgimiento inicial 1965-1975 de la porcicultura en Huatabampo y sur de Sonora, ya existían las grandes granjas porcinas de 1,000 vientres. El desarrollo de la actividad porcícola en México de 1970 al 2017 es analizada por Juárez 2017 describiendo su desarrollo, vaivenes políticos y económicos y sus ciclos de despoblación de vientres.

Para poder controlar el virus del síndrome reproductivo y respiratorio porcino (PRRS) a principios de los 90s, las granjas modifican severamente su diseño estructural separándose en sitios 1 exclusivamente para reproductores y maternidad, el sitio 2 para albergar cerditos recién destetados a edades entre 16-21 días de inicio para entrar y los sitio 3 son los corrales de crecimiento, engorda y finalización, consideradas las unidades de mayor consumo de alimento. Durante 1995 los porcicultores individuales para mantenerse en el negocio empezaron a rentar, comprar o construir granjas para manejar más de 5,000 vientres en granjas separadas. Se integraron horizontalmente con rastros TIF, plantas de corte y proceso de carnes, unidades de fletes y plantas de alimento balanceado. De esta manera en el 2000 se construyen individualmente granjas reproductoras con instalaciones para albergar 5,000 vientres, con maternidades que rescatan lactaciones de 21 días.

La SEMARNAT en coordinación con la SADER crea un programa nacional aplicado por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) para construir lagunas cubiertas de

plástico PVC de membrana gruesa en apoyo a los productores lecheros, porcícolas y rastros TIF, para que pudieran reducir sus niveles de contaminación y poder apearse a las leyes vigentes de la Norma sobre Desechos de Aguas Residuales NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-052-ECOL-1993, NOM-001-ECOL-1996, NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-087-ECOL-SSA1-2002, NOM-161-SEMARNAT-2011, Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR), Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente, Ley federal de derechos en materia de agua, NOM-127-SSA marca límites del agua para uso humano y así evitar multas y cierre de operaciones de establos y granjas confinadas de cerdos. El que contamina debe pagar, ya que hay regulaciones pecuarias para reducir gases con efecto invernadero.

Hernández 2007 informa a detalle, desde 1994-2006, con fotografías didácticas, la participación de la SAGARPA, FIRCO, Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF), SANDIA de los EUA y en su conjunto el Proyecto de Energía Renovable para la Agricultura (PERA); como la participación financiera de las empresas nacionales AgCert de México Servicios Ambientales S. de R.L. de C.V., Eco Securities LTD, AgStar (EPA_USDA).



Se instalaron en todo México 479 lagunas de digestión anaeróbica en las que resaltan Sonora con 157, Jalisco 124 y en la Comarca Lagunera 64, pero éstas son tan solo el 8% de las necesidades nacionales para reducir la contaminación de las instalaciones de animales confinados. Méndez 2015

PORCICULTURA SONORA : Los pioneros inmigrantes que compraron tierras agrícolas en el valle del Yaqui como Herman Bruss de origen alemán en 1911 tenía 100 cochis en su campo. En 1926 el General Álvaro Obregón criaba 400 porcinos en el campo 30. Ahora el estado de Sonora ocupa el 2do lugar de producción nacional con 380 granjas de cerdos en operación, albergando 185,000 vientres reproductores para producir al año 1.4 millones de toneladas de cerdo en pie en los sitios de las granjas en engorda y finalización. Escobedo 2007 hace una amplia reseña.

En su parcial exportación de carne en canal desde 1974 y cortes especiales, principalmente al mercado japonés, aportan divisas por más de \$300 millones de dólares al año. Hay regulaciones del mercado internacional por la Asociación Mexicana de Exportaciones de Carne de Cerdo (Mexican Pork). La Organización de Porcicultores Mexicanos (OPORMEX) presenta una visión estratégica de la industria porcina mexicana hacia el futuro. No se fija una meta de destino, un punto de llegada; sino un planteamiento de proceso continuo, realizando una jornada de ser mejores, avanzando sin parar cada día.

Sonora es considerado un estado ganadero, cuenta en su escudo estatal con una cabeza de toro Herford, pero sus ventas nacionales de carne total de cerdo superan los \$13.7 mil millones, siendo 1.5 mayor que la comercialización de carne de res al año. Datos de la ganadería del estado de Sonora. Se podría pensar en incorporar un cerdo al escudo.

En el 2004 AgCert, una empresa extranjera se instala con oficinas centrales en México D.F, con fines de generar bonos de carbono en granjas y establos a nivel nacional para ser vendidos en el mercado internacional, cotizando en la bolsa de Londres Pérez 2018. Los créditos de carbón se negocian en el Chicago Climate Exchange (CCX). En el 2008 tenía un rango de 1.90-7.40 dólares por toneladas CO₂ con promedios de \$5.00 por toneladas de carbón. En el 2013 alcanzó \$15 dólares. En un centro de operaciones de campo en Cd. Obregón se construyeron 100 lagunas biodigestoras calculadas a la capacidad del tamaño de cada granja porcina. Si bien incursionaron un poco en establos lecheros y granjas de producción de huevo. De alguna manera la empresa sale de operaciones en México. Posiblemente sus instalaciones siguen funcionando y continúan en operación, ya que las granjas porcinas más grandes con mayor capacidad de animales instalaron generadores eléctricos específicos para combustión de gas metano y resistentes al ácido sulfúrico, sin ser afectados durante la marcha por otros componentes de gases corrosivos, pero sin potencial calórico. Se requiere un nuevo estudio.

Al incremental la presión legislativa gubernamental para que las granjas redujeran los contaminantes ambientales que eran depositados al aire libre, en drenes, vasos de arroyos y en ocasiones conducidos hasta la desembocadura del mar. El Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) continuó apoyando a los productores porcinos para instalar 157 biodigestores. Méndez 2015. Sin embargo, la mayoría de las granjas con lagunas biodigestoras tan solo quemar al aire el gas metano colectado y no utilizan su energía calórica para reducir costos en calefactores y existe un bajo empleo de excrementos porcícolas para ser incorporados al suelo agrícola con el fin de mejorar la estructura del suelo, incrementar el contenido de materia orgánica y aprovechar como abono el aporte de minerales.

Una empresa alemana que maneja los bonos de carbono en el mercado internacional se ha establecido 2023 en América, con oficinas en EUA y México, para realizar proyectos sostenibles de captura con energía circulante en las industrias. Otra de Inglaterra trabaja desde Jalisco. Para la porcicultura mexicana son una alternativa de continuar construyendo proyectos técnicos de economía circular generando electricidad a partir de las excretas desechadas.

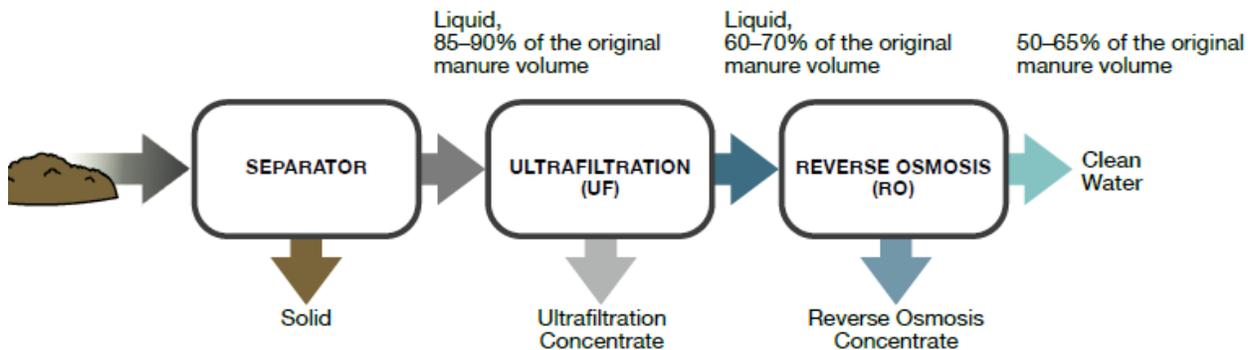
El aprovechamiento de la energía circulante permite ahorros que en este ciclo productivo 2024 con bajos precios del cerdo en pie, sería de mucha ayuda para la revolvencia financiera y sostenerse en la actividad porcícolas.

Desde el 2020 en Sonora se han construido nuevas granjas porcinas con corrales de gestación para manejar en una sola unidad 10,000 hembras reproductoras, unas pocas ya en funcionamiento y producción y otras en proceso de construcción.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de una búsqueda intensiva de artículos científicos seleccionados en buscadores académicos con reportes de investigación abalada por pares. Resaltan la producción controlada de gas metano por medio de reactores de biodigestión anaeróbicas. Normalmente el excremento en suspensión líquida pasa por gravedad a una laguna de decantación a cielo abierto para precipitar pelos, basura sólida y otros productos de descarte. Continúan pasando los efluentes a una laguna profunda de almacenamiento y retención para su descomposición en la que con el tiempo emiten al aire diversos gases que causan un efecto de invernadero, olores y contaminación si se desborda la capacidad de retención de líquidos.

Para su aprovechamiento controlado como recurso energético la laguna se cubre con plástico bajo un sistema de fermentación sin oxígeno para que los microorganismos establezcan en su etapa inicial de 120 días, sus poblaciones para producir gas biometano, el cual queda retenido junto con otros gases con la cubierta de geomembrana. Después del período de fermentación de 5 días, los carbohidratos más simples de cadena corta se han transformado al concluir el ciclo biológico exponencial de reproducción y crecimiento poblacional de los microorganismos, hongos, Bacilos y Archaea metanogénicas, proceso en el que metabolizaron biometano.



Para establecer como alternativa en una granja porcina un biodigestor en batería de flujo diario, como lo haría el proceso de fabricación de cerveza. Una bolsa de geomembrana individual con capacidad para retener los efluentes colectados de cada día y que perdure colectando biogás por 30 días alargando el período del biorreactor. Sería un sistema con 30 reactores separados más las bolsas del sistema en el proceso de limpieza, recarga de inicio y aprovechamiento del gas retenido. Al igual que la fermentación de la cebada maltera en recipientes secuenciales en batería, todos los días embotellan y todos los días llenan un tanque limpio de nuevo. Aun así, generan un desecho del bagazo pastoso de cerveza, mientras que en el pasado en las granjas porcinas se han usado modelos de biodigestión continua, semicontinua y sistema discontinuo, por lote y batch. Pampillon 2018.



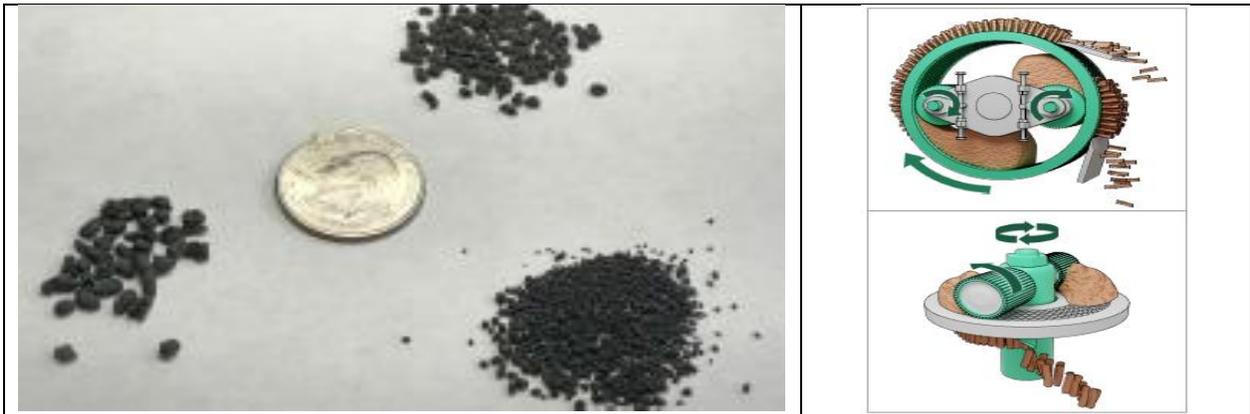
Fotos de Carolina del Norte con laguna de decantación y la instalación de 30 reactores en batería, para generar biogás que pasa de separación de gases para cuantificar los bonos de carbón y generar electricidad con un motor de combustión interna. Y abajo a la derecha en México para 300 cerdas, se diseñaron 10 reactores.

Los microorganismos de la fermentación para producir biogás requieren de un medio líquido, no tiene que ser agua potable, por lo que las aguas de la bolsa que se va a vaciar para limpieza se reciclan, conducida por tubos de circulación interna, sin estar expuestas al aire, evitando oxigenar el medio, pasan la bolsa de llenado nuevo, incrementando el volumen controlado de retención de ese día y aportando inóculos microbianos ya adaptados por selección natural del proceso establecido.

Después de 5 días de fermentación inicial quedan por digerirse y contribuir a su aporte energético las partes del grano no digeridas de celulosa. Por ello cada biorreactor debe recibir en codigestión excrementos de corrales de engorda y establos lecheros o desde el rastro de bovinos utilizar los residuos estomacales con bacterias vivas del rumen, introducirlos dentro de cada cámara de fermentación. Cada rumen fresco de la canal puede contener 55 kilos de alimento y se pueden colectar 11 kilos diarios de boñigas en corral Ocaña 2013. Obtener lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e incorporar como inóculos los agentes vivos de ese medio de cultivo. A falta de este insumo natural se pueden incorporar un consorcio bacteriano adecuado, como inóculo de bacterias vivas cultivadas de *Clostridium cellulovoma* que sintetiza enzimas en condición anaerobia, *Ruminococcus*, *Fibribacter*, *Eacillus*, Protozoos, Hongos o aplicar directamente un conjunto de enzimas celulosomas, endoxilanasas y poligalacturonasas que hidrolizan la celulosa. Castillo 2011.

Al separar excrementos fermentados de la materia líquida de la bolsa en proceso de limpieza, la materia orgánica rica en fibras de celulosa se revaloriza como un nuevo insumo, reutilizando nuevamente para la cría de insectos comestibles, como larvas de

mosca soldado-negra *Hermetia illucens* que procesa residuos orgánicos descomponiendo la materia orgánica y su crianza doméstica produce proteína con calidad alimenticia para la granja, en sustitución de otras fuentes de alto costo de adquisición. Al concluir el ciclo biológico, durante la cosecha de los insectos, los desechos se utilizan como abono orgánico para la agricultura, generando economías en la mejora de la retención del agua de riego en el suelo agrícola. Alternativas para mejorar la eficiencia integral de producción de gas CH₄ alargando el tiempo de retención o recarga orgánica, como de oxígeno y valorar el aprovechamiento reciclable de sedimentos sólidos, economía circular de energía calórica y eléctrica, con el objeto de disminuir la contaminación e incrementar la rentabilidad de la empresa.



Comprimidos pelletizados secos para maniobrarlos como fertilizante de fácil aplicación agrícola, se elaboran en el Valle del Yaqui. También tienen potencial como carbón para calderas y posiblemente parrilladas también, es decir para la carne asada.

Los líquidos excedentes de la fermentación contienen nutrientes adecuados y concentrados de NPK como fertilizantes y con tratamiento adecuado para el cultivo de espirulina, algas o aplicar los líquidos al riego agrícola. Del cultivo de espirulinas, cyanobacterias se pueden producir plásticos resistentes biodegradables caracterizados azul-verde. Hay granjas porcinas que integran horizontalmente las praderas irrigadas de forrajes con aguas residuales, ayudan a clarificar los residuos, creando un humedal artificial como regulador de emisiones de amoníaco y valorando los excrementos como abono agrícola en cultivos asociados de zacates Bermuda, Brachiaria y leguminosas que consumen los rumiantes. Otros tratamientos de aplicación factible son adsorción, filtración, electrolisis, precipitación, coagulación, floculación.

Cada sistema tiene su propio diseño de ingeniería biológica para su funcionamiento. Tecnología disponible para grandes capacidades de producción. Analizar y diseñar el modelo de batería para lograr una mayor conversión de sólidos orgánicos a la producción de gas metano, para incidir en mayor cuantía a la reducción de contaminantes del vertedor de salida de aguas negras de la granja. El cultivo de alga *Scenedesmus almeriensis* liofilizada se puede obtener proteína precipitada de alta calidad nutritiva. Otros cultivos de microalgas con productos benéficos *Dunaliella tertiolecta* (aceite comestible), *Chaetoceros muelleri* (proteína), *Haematococcus pluvialis*, *Tetraselmis*

suecica. El Jacinto de agua o patito *Eichhorna crassipes* Mart., considerada como maleza se cultiva su biomasa para producir etanol.

Se establece una biorrefinería de subproductos para valorizar por sistema de conducción controlada en cada fase, un esquema de bioeconomía circular como recurso energético a los subproductos líquidos para obtener biofertilizantes de las aguas de desecho, así como reutilizando el agua de limpieza reciclada y empleando los sólidos húmedos para la producción de proteína de insectos comestibles para posteriormente ir incorporando las compostas deshidratadas y abonos húmedos a las tierras agrícolas para incrementar la materia orgánica del suelo y capacidad de retención del agua de riego, al mejorar las propiedades porosas del suelo.

Secar en invernaderos ventilados las excretas para ser ensacadas como abono de plantas y mejorador de suelos en la agricultura comercial. El calor generado en la misma granja.

En su conjunto estratégico incorporado integralmente reducir la huella ambiental de carbono de la granja porcina, reducir malos olores y generar ahorros e ingresos para amortizar las inversiones, con la posibilidad de gestionar créditos de carbono en el mercado internacional.

REVISIÓN LITERARIA

Un estudio nacional de FIRCO 2009 constata la instalación de 345 biodigestores en 11 estados, en su mayoría para granjas y pocas en establos. Posteriormente un seguimiento de campo FIRCO 2013 reporta para 13 estados la construcción de 138 biodigestores en las que sobresalen Yucatán con 41 y Jalisco con 21, para Sonora solo 2, la Comarca Lagunera 39 y muy posiblemente en establos. Durante el programa anual se instalaron 43 motogeneradores de gas metano convertida a electricidad, de las cuales Yucatán echó a andar 32 motores.

Ensayos de codigestión anaeróbica para lagunas de granjas porcinas o lecheras, con cubiertas de plástico, incorporan mezclas de residuos agroindustriales y esquilmos agrícolas para generar biomasa en bioenergía renovable. Plascencia 2014

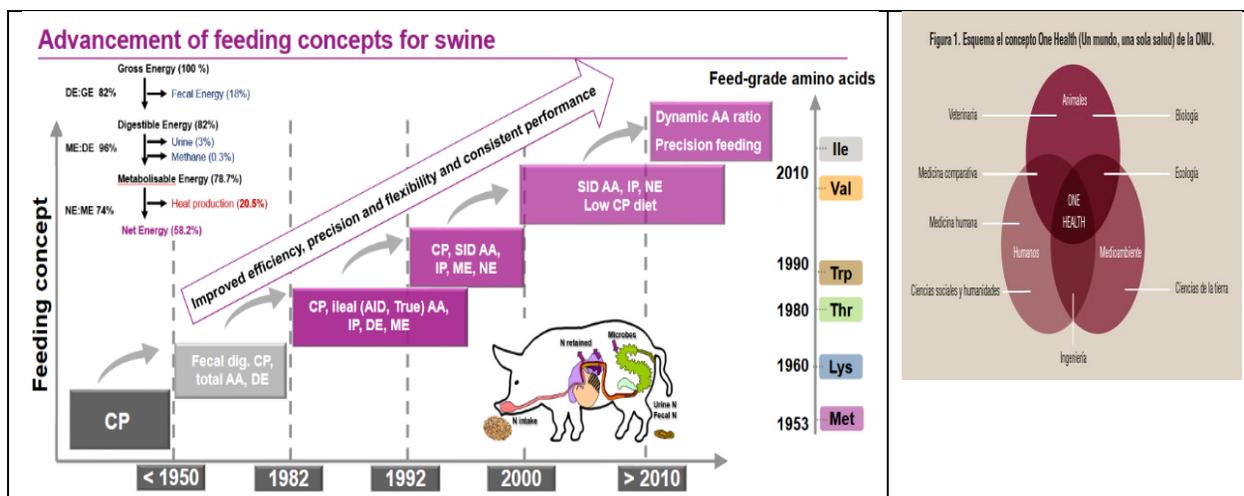
El biogás se genera por medio de materiales de plantas y animales en un medio de biodigestión. Puede ser quemado para reducir las emisiones de contaminantes del aire o ser combustible para un generador eléctrico adaptado a este gas. Su tamaño varía para hacer funcionar una hornilla de cocina hasta motores de barco Prehn 2010

La relación de la biomasa y su contenido de nitrógeno no favorece a las excretas porcinas por tener una relación inferior carbono:nitrógeno de 8C:1N Weber 2023. En realidad, se prefieren rangos de 40C/1N porque niveles altos de amoníaco inhiben la producción de CH₄ y si no es factible, se debe incrementar el volumen del medio líquido de cultivo.

Las tecnologías alternativas existentes indican que la economía circular de los desechos producidos en la granja sea agua, excrementos, animales muertos y otros se deben

incorporar para su reciclaje, creando otro producto. Aprovechar los líquidos de la limpieza de corrales, generación de energía calórica o eléctrica que permita la reducción o ahorro de los costos de producción. Los cadáveres porcinos por compostaje, por hidrólisis alcalina, o con contenedores para hidrólisis no son desecho sino un ingreso por ventas de abonos. Los animales muertos pueden ser homogenizados con trituración de sus partes para incorporarlos a los biodigestores anaeróbicos en la producción lenta de gas.

El procesamiento y aprovechamiento eficiente de la materia orgánica que se elimina de las unidades productivas reduce significativamente las aportaciones de contaminantes que se desechan al ambiente. Cada granja sitio 1 de reproductoras, sitio 2 con lechones en desarrollo y sitio 3 engordando cerdos para matanza. Por su edad fisiológica reciben diferentes dietas formuladas con precisión para satisfacer sus requerimientos nutricionales, la digestibilidad del alimento difiere en cada sitio, como los insumos estacionales regionales, nacionales e importados que se incluyen en la dieta balanceada. Hay en el mercado software profesional disponible para el cálculo de la huella de carbono y la huella ambiental del sector porcino. No es lo mismo, sino algo similar al balanceo de raciones, pero va incluido en el cálculo.



Así que el potencial de producir gas metano eficientemente de manera renovable, varía para cada sitio de granja porcina, como de la calidad y cantidad del agua para beber y lavar los corrales, formando parte del medio de cultivo microbiano. Los minerales de la dieta contribuyen también a los solutos que darán el pH del medio acuoso de la laguna de digestión. Contrario a lo que se había pensado, si los antibióticos del alimento reducen la carga metanogénica afectando la capacidad de generar biogás. No es así, los resultados resaltan que las poblaciones de methanorevibacter las cuales son eficientes para producir metanol, sean más abundantes.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA O LITERATURA CITADA

Buzinaro Avaci Angélica 2013. Financial economic scenario for the microregeneration of electric energy form swine culture originates biogas.

Castillo Vázquez Nidia Paola 2011. Caracterización de bacterias degradadoras de celulosa y almidón.
<https://smbb.mx/congresos%20smbb/queretaro11/TRABAJOS/trabajos/IX/carteles/CIX-04.pdf>

Escobedo Juan Carlos 2007. La porcicultura en Sonora.
https://www.academia.edu/30929913/La_porcicultura_en_Sonora?auto=download

Feuchter A. Fernando R. 2023 Nueva porcicultura sostenible
Feuchter A. Fernando R. 2023 Marranas y lechones en maternidad, nueva tecnología
Feuchter A. Fernando R. 2023 La porcicultura mundial necesita certificarse para acceder al mercado de exportación.
Feuchter A. Fernando R. 2022 Resultados sostenibles de la nutrigenómica porcina
Feuchter A. Fernando R. 2018 La ganadería del futuro. Del pasado al presente.

FIRCO 2009 Diagnóstico general de la situación actual de los sistemas de biodigestión en México
<https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Diagnostico-Nacional-de-los-Sistemas-de-Biodigestion.pdf>

Ganadería del estado de Sonora 2024.
<https://www.sonora.gob.mx/datos/ganaderia>

Hernández Abel 2007 Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario.
https://www.academia.edu/14836448/APROVECHAMIENTO_DE_BIOG%C3%81S_PARA_LA_GENERACI%C3%93N_DE_ENERG%C3%8DA_EL%C3%89CTRICA_EN_EL_SECTOR_AGROPECUARIO

INECC 2021. Estimación de costos y beneficios asociados a la implementación de acciones de mitigación para el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones comprometidos en el Acuerdo de París. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Juárez Mosqueda María de Lourdes 2017 Comportamiento de la porcicultura mexicana de los años 1970 a 2017. Una revisión documental sobre su desempeño.
https://www.academia.edu/108105667/Comportamiento_de_la_porcicultura_mexicana_de_los_a%C3%B1os_1970_a_2017_Una_revisi%C3%B3n_documental_sobre_su_desempe%C3%B1o?auto=download

Méndez L. Jaciel R. 2015 Sonora en las redes globales de suministro de carne de puerco a Japón, 1990-2012. Tesis del posgrado en integración económica.
<https://integracioneconomica.unison.mx/wp-content/uploads/2019/01/Jaciel-Mendez-Sonora-en-la-redes-globales-de-suministro-de-carne-de-puerco-a-Japon.pdf>

Ocaña Sánchez Marcia Cecilia 2013 Propuesta de reúso de desechos orgánicos obtenidos del proceso de eviscerado del Centro de Faenamiento Ocaña Cía. Ltda. De la ciudad de Quero para disminuir la contaminación del suelo.
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/24942>

Ochoa Hernández María Elena 2022. Evaluación de la comunidad microbiana de un biorreactor híbrido para tratamiento de aguas residuales porcícolas. Página 62.

ONU 2021. Naciones Unidas. Reducir las emisiones de metano un 45% en 10 años es factible y crucial para frenar el cambio climático.
<https://news.un.org/es/story/2021/05/1491742>

Pampillon G. Liliana 2018 Producción de biogás: Fundamentos y parámetros de diseño.
<https://pcientificas.ujat.mx/index.php/pcientificas/catalog/book/191>

Pérez E. Rosario H. 2018 Estrategias de mitigación. El programa de biodigestores en Yucatán, México
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-57662018000200235

Plascencia R. Cinthia E. 2014 Estudio de codigestión de residuos orgánicos agroindustriales para la producción y uso de biogás. CIDETEQ
<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/331/1/Estudio%20de%20codigesti%C3%B3n%20de%20residuos%20org%C3%A1nicos%20agroindustriales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20y%20uso%20de%20bi%C3%B3gas.pdf>

Prehn Manuela 2010 La bioenergía en México: Estudios de caso No.1 Red mexicana de bioenergía AC
<https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/CT1.pdf>

Suárez J. Blanco D. 2015. Eficiencia del tratamiento de residuos porcinos en digestores de laguna tapada. Pastos y Forrajes Pág. 441-337.

Vidal Amaro Juan J. 2017 A transition strategy from fossil fuels to renewable energy sources in the mexican electricity system.

Wang, Y. 2009, Hydrogen methane production from swine manure: Effect of pretreatment and VFAs accumulation on gas yield.

Weber Bernad 2023 Producción de biogás en México. Estado actual y perspectiva. Red mexicana de bioenergía AC.
<https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/CT5.pdf>

https://isbnmexico.indautor.cerlalc.org/catalogo.php?mode=busqueda_menu&id_autor=96835

https://www.academia.edu/18081675/Tratamiento_de_la_fracci%C3%B3n_I%C3%ADquida_de_purines_de_cerdo_mediante_un_reactor_discontinuo_secuencial_SBR_

<https://www.sciencedirect.com/search?q=SWINE%20METHANE&years=2024&lastSelectedFacet=years>