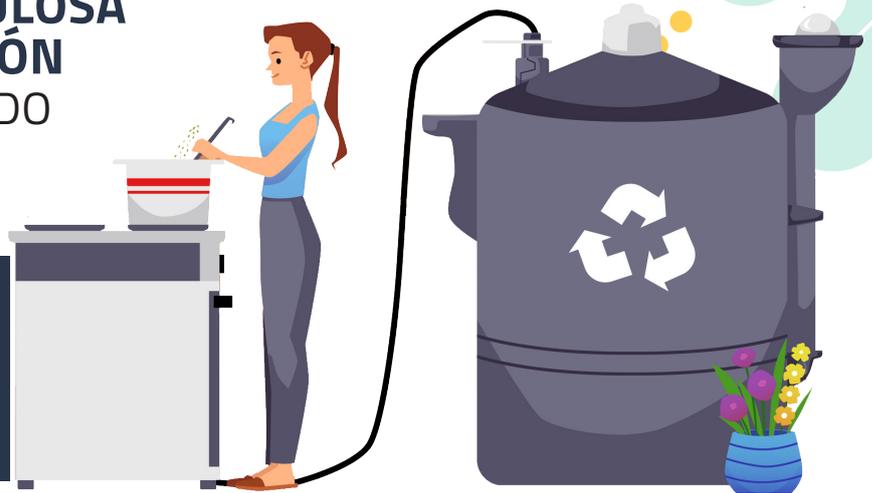


# DISEÑO DE UNA PRECÁMARA PARA DEGRADAR CELULOSA Y OPTIMIZAR DIGESTIÓN ANAERÓBICA UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INNOVACIÓN

• Kevin Cortés M. • Esteban Gatica M.  
Ex-Alumnos, Ingenieros Civiles Industriales Titulados  
El Año 2020

• Sergio Cardenas  
Dr. en Bioquímica



Artículo derivado de la memoria de título para Ingeniería Civil Industrial del año 2022 con título “diseño de un prototipo a escala de laboratorio para transformar desechos de celulosa derivados de procesos agropecuarios en productos de mayor valor utilizando herramientas de innovación”

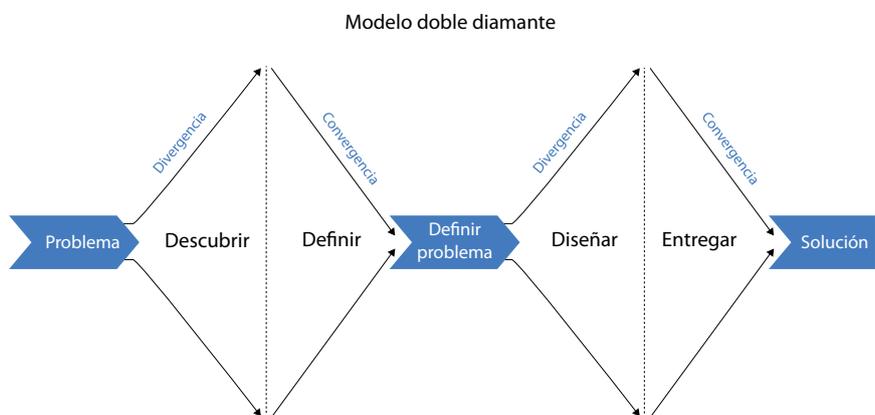
En el sector rural, se generan grandes cantidades de residuos agropecuarios y solo parte se reutiliza. De estos residuos, los más relevantes son estiércol animal derivado de caballos y vacas entre otros animales de cría, que en muchos casos se esparcen en suelos tal como se generan, lo que produce malos olores, atracción de vectores infecciosos como moscas y roedores y muchos líquidos derivados del lavado de establos, simplemente se infiltran por la tierra pudiendo llegar a aguas subterráneas, y canales de riego, sin haber tenido ningún tipo de tratamiento. También es relevante la generación de desechos agrícolas lignocelulósicos como tallos y hojas de plantaciones como maíz, trigo y avena, los cuales en parte se dan a animales como alimento, pero en campos de cierta superficie la generación es tan alta que estos se acumulan y para eliminación simplemente se queman (Taladriz et al., 2012), lo que libera partículas contaminantes y que contribuye al calentamiento global. Hay estudios que muestran un impacto muy significativo de la quema de rastrojos agrícolas en el país, todo por la falta de tratamientos alternativos adecuados para estos (Baldini, 2018). Debido a lo anterior, se está impulsando en el país diversos métodos para el tratamiento y transformación de estos residuos, como compostaje, vermicultura o digestión anaeróbica, los cuales transforman los residuos en productos con valor comercial. Todas estas metodologías son lentas y no siempre muy eficientes, por lo que universidades e institutos de investigación, en Chile y el mundo, están trabajando en I+D & i para mejorarlos.

en fertilizantes y energía, pero se han encontrado con el grave problema de que el material lignocelulósico no se puede degradar fácilmente en este proceso, lo que baja la eficiencia de forma impactante (Stegmaier, 2019). Esto implica que el proceso de digestión anaeróbico puede tomar mucho más tiempo que el esperado, y que parte importante de los residuos nunca puedan transformarse, quedando como desechos del proceso. A partir de este problema se planteó un tema de memoria de pregrado de ingeniería civil industrial, que consistió en como mejorar la degradación de el material lignocelulósico en los modelos y prototipos de digestores anaeróbicos del laboratorio de la Universidad Central de Chile con procesos de innovación.

La innovación es un proceso de varias etapas que puede realizarse aplicando varias metodologías diferentes. En este caso se utilizó la metodología doble diamante, la cual fue desarrollada en esta memoria logrando como resultados diseños de posibles prototipos que podrían resolver el problema planteado.

## Metodología

En la memoria se comenzó a utilizar la metodología Deep Dive, la cual en su primera etapa requiere empatizar con el cliente para poder comprender el contexto de la problemática. Como esto extendía demasiado el proceso de investigación, se decidió cambiar a la metodología Double Diamond (Doble Diamante), que tiene una estructura más directa en la búsqueda de información y se debe realizar un análisis de las posibles soluciones que se planteen para elegir la más factible de realizar.



**Figura 1**  
Diagrama del método de innovación doble diamante  
Fuente: Elaboración propia.

En la Universidad Central de Chile se está estudiando la digestión anaeróbica de residuos agropecuarios para transformarlos

La metodología doble diamante es una metodología que consta de una serie de etapas claramente definidas, por lo tanto, el desarrollo del trabajo se dividió cada una de estas:

- La primera es la etapa de “Descubrir”, en la cual se debe obtener toda la información posible para entender claramente el problema que se trabaja. Esta etapa requiere de revisión de documentos visitas a terreno y entender al usuario que presenta el problema. En esta etapa se conversó con los expertos del laboratorio de la universidad, con el objetivo de conocer el funcionamiento del digestor, luego para comprender el contexto de la problemática, se analizaron documentos científicos tales como revistas científicas, papers y tesis, además de interacciones con los encargados del biodigestor anaeróbico que se tenía en la universidad.
- La segunda etapa corresponde a “Definir”, la cual consiste en determinar las causas más relevantes del problema en estudio. En esta etapa, luego de tener una visión amplia del problema se “definen los aspectos que más contribuyen al problema y por eso se toma a esta etapa como una “convergencia”, que viene después de la divergencia que consistió en el reunir toda la información necesaria de la primera etapa.
- La tercera etapa corresponde a “Diseñar”, en la cual mediante la realización de una lluvia de ideas y conversaciones con los investigadores, se postularon posibles soluciones para cada una de las causas que se definieron en la segunda etapa, escogiendo aquellas que sean más factibles de realizar. Cada una de las ideas, se asocian en una sola solución y se arma un prototipo. Este prototipo tiene diversos niveles de calidad, los primeros se llaman prototipos de baja resolución, los cuales consisten inicialmente en bocetos en papel, y luego diseños más formales en computador. Solo teniendo estos prototipos, se puede pasar al prototipo mínimo viable, el cual ya tiene que funcionar con respecto a lo planteado.
- “Entregar”, es la última etapa. En esta no solo se entrega, sino que se valida por el cliente o usuarios. Esta es una etapa en que se itera con la etapa 3 y se van desarrollando diversos prototipos cada vez más cercanos a los que se necesita hasta llegar al definitivo, que es aceptado finalmente.

## Desarrollo

La celulosa, parte de la estructura lignocelulósica de las plantas (lignina y celulosa), es un compuesto de carácter orgánico básico del tejido de las plantas, la cual tiene la característica de brindarles rigidez y conforma su estructura principal. En otras palabras, es el polímero que se encuentra en las paredes celulares de los vegetales, el cual presenta como característica, el poder generar una gran cantidad de ramificaciones a lo largo de los vegetales, es la encargada de proporcionarle la resistencia mecánica a los vegetales a través del tallo y sus hojas. Esta estructura es un polímero de glucosa, es decir, unidades de azúcar que polimerizan en fibras muy resistentes que soportan a la planta. Esta glucosa es un nutriente que rápidamente puede digerirse en los biodigestores anaeróbicos, pero primero hay que sacarlos de las fibras de celulosa. El problema que presenta la celulosa es que no se degrada de manera natural, por lo que se necesitan de tratamientos y microorganismos, para poder llevar a cabo el proceso de degradación de la celulosa

La digestión anaeróbica transforma grandes moléculas orgánicas en pequeñas estructuras inorgánicas con altos potenciales energéticos y fertilizantes. Por esta razón, se han desarrollado a lo largo de los años diversos sistemas de tratamiento anaeróbico llamados digestores o biodigestores anaeróbicos, los cuáles tratan diversos residuos industriales y agroindustriales para transformar estos residuos en gas combustible y otros productos valorizables. A nivel industrial, los residuos semisólidos como los derivados de procesos, agropecuarios se han tratado con digestores anaeróbicos

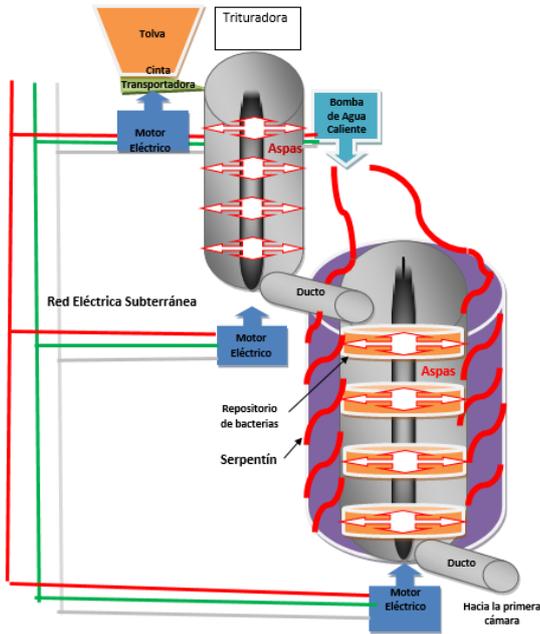
que incluyen control de temperatura y agitación en un gran biorreactor que mezcla todos los procesos anaeróbicos en un solo recinto. Este tipo de biodigestores se llaman reactores de mezcla completa, que por simpleza de operación se ha desarrollado ampliamente a nivel mundial. Sin embargo, este tipo de biodigestores han demostrado una eficiencia limitada, principalmente al no poder separar las diferentes etapas de la digestión anaeróbica, y adicionalmente, al perder en el final del proceso grandes volúmenes de las bacterias metanogénicas, las cuales son claves de este proceso.

El nuevo modelo de biodigestor anaeróbico que se trabaja en el laboratorio de la Universidad Central de Chile demostró una alta eficiencia en degradación de residuos semisólidos orgánicos a nivel de laboratorio, por lo que en una segunda etapa, se evaluó el funcionamiento con excremento bovino y suero de leche de procesos de fabricación de queso, pero no se logró el rendimiento esperado. Para un proceso de digestión anaeróbico adecuado, se requiere cierta concentración de azúcares y proteínas que normalmente están contenidos en el suero de leche y el excremento animal. Los análisis realizados en el laboratorio demostraron que el problema del funcionamiento del biodigestor anaeróbico, fue la falta de azúcares degradables en este tipo de residuos agropecuarios, pero la información teórica publicada y corroborada en el laboratorio, fue que estos residuos sí contenían una cantidad adecuada de azúcares para lograr el funcionamiento del proceso, pero éstos estaban en forma de fibras de celulosa que requerían de un tratamiento previo, siendo éste un factor clave para el prototipo de digestor que se diseñó, ya que, satisface dicho factor. Los análisis demostraron que los excrementos bovinos contienen casi un 50% en masa de material lignocelulósico que no puede ser transformado en azúcar degradable por las bacterias anaeróbicas, y si se pudiera degradar esa celulosa en azúcares tipo mono y disacáridos, el proceso del biodigestor volvería a lograr las eficiencias observadas anteriormente.

Al observar el proceso de digestión anaeróbica, evaluando la transformación de residuos agropecuarios a varios productos valorizables como un gas con alto contenido calórico para uso energético, un líquido con alta concentración de nitrógeno inorgánico como fertilizante para las plantas y un sólido con altos contenidos de fósforos y otros nutrientes vegetales que pueden alcanzar altos valores en el comercio, es que éste proceso resulta de un gran interés para el tratamiento de residuos agropecuarios, ya que no sólo disminuye su contenido orgánico contaminante y atractor de vectores infecciosos, sino que los transforma y valoriza, generando una nueva fuente de ingresos a los pequeños productores agropecuarios. Sin embargo, tal como se describió anteriormente sobre el biodigestor anaeróbico, estos residuos contienen un alto contenido de material lignocelulósico que debe ser pretratado antes del ingreso a la digestión anaeróbica.

Se investigó intensamente sobre degradación de celulosa, identificando diversos procesos tipo físicos, químicos y biológicos. Tras conversaciones con los expertos del laboratorio de la universidad, se decidió que se debe implementar un sistema biológico a manera de pre-tratamiento al sistema de digestión anaeróbica. Debido al carácter biológico del biodigestor anaeróbico, incluir un pre-tratamiento biológico para degradar celulosa es lo más coherente y fácil de implementar y por lo mismo, los procesos químicos se deben descartar. Como sistemas biológicos se identificaron dos factibles, hongos de pudrición y bacterias derivadas de los estómagos de animales rumiantes. Tras esta definición, se volvió a entrevistar a los especialistas del laboratorio y se contrastaron los factores que pueden ser implementados en el biodigestor anaeróbico y los requerimientos de los sistemas biológicos en estudio. Todos los análisis nos llevaron a plantear a las bacterias de animales rumiantes como el sistema de degradación de celulosa de elección, donde los aspectos más relevantes fueron temperatura, humedad, posibilidad de ambientes anaeróbicos y

un problema potencial que podría generarse con los hongos si generan esporas, ya que podría ser inutilizable como fertilizantes los líquidos y sólidos derivados de la biodigestión anaeróbica si contienen esporas de hongo de pudrición ya que podría dañar cultivos. Con esto ya definido, se diseñó un primer prototipo para validarlo con los expertos del laboratorio.



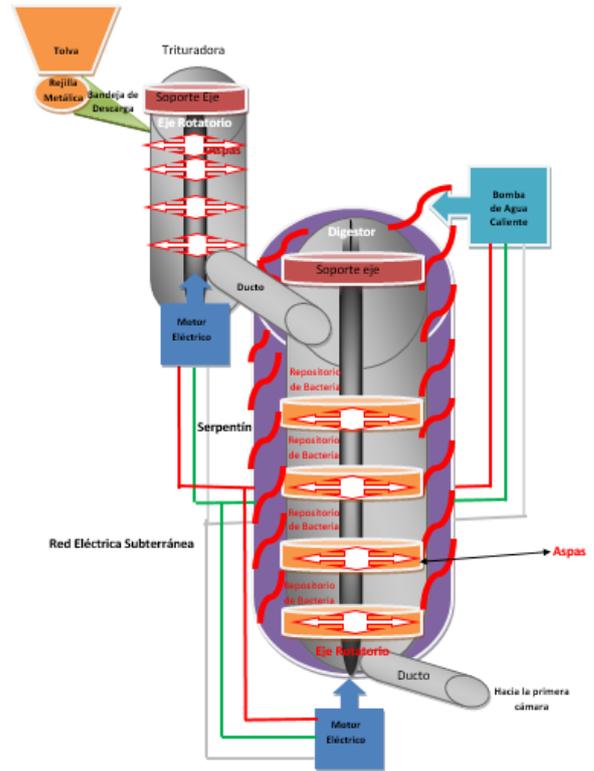
**Figura 2**

Bosquejo inicial del prototipo / Fuente: Elaboración propia.

El bosquejo inicial comienza con la incorporación del sustrato en la tolva por parte de los agricultores, luego ese sustrato cae hacia una cinta transportadora para ser llevada hasta la trituradora, en la cual se disminuye su tamaño y mediante un ducto es incorporado al digestor. En el interior del digestor se encuentra un sistema de serpentín con calderas que hacen circular el agua para mantener la temperatura de 35°C, que es la temperatura promedio requerida para que se mantengan las bacterias en condiciones de degradar, también se cuenta con un sistema de agitación por aspas y un repositorio donde se depositarán las bacterias, por lo que una vez que cae el contenido, comienzan a girarse las aspas y a revolver tanto la mezcla como las bacterias para que se adhieran a la superficie del sustrato y comienzan a liberar enzimas (celulasas) que hidrolizan la celulosa y la transforman en un líquido con glucosa para ser depositado por otro ducto hacia la primera cámara del biodigestor de la universidad. Cabe destacar que se cuentan con tres motores eléctricos para hacer funcionar la cinta transportadora, la trituradora y las aspas del digestor.

Este diseño se presentó a los expertos para que lo validen y ellos sugirieron modificaciones para mejorar la eficiencia del prototipo, como eliminar tantos motores y la cinta transportadora y se diseñó un segundo modelo de pre-tratamiento, tal como se muestra en la figura 3.

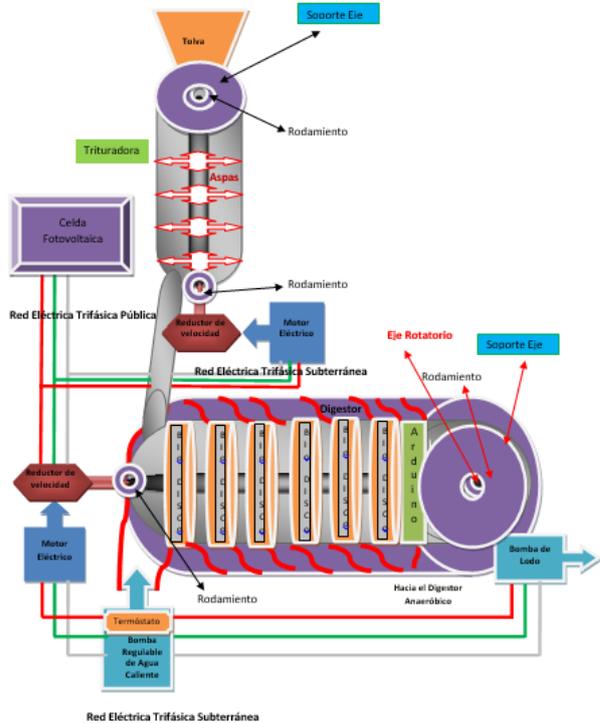
Luego que se analizó el primer diseño, se definió que se necesitaba de una rejilla metálica removible que se incorporara en la tolva por seguridad, dado que en caso de que el material contenga piedras, éstas queden depositadas en la rejilla y no sigan hacia la trituradora, además se decidió reemplazar la cinta transportadora por una bandeja de descarga, debido a que representa un ahorro energético dado que se evita la utilización de un motor eléctrico, y si se coloca de tal forma que por gravedad caiga el material hacia la trituradora se cumple la función de igual manera. También, se incorporó un eje rotatorio con su respectivo soporte para que las aspas puedan girar con mayor facilidad. Con



**Figura 3**

Primera iteración del prototipo / Fuente: Elaboración propia.

esta primera iteración se interactuó nuevamente con los expertos, quienes volvieron a sugerir modificaciones por lo cual se realizó una segunda iteración que se muestra a continuación.



**Figura 4**

Segunda iteración del prototipo / Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar de la ilustración presentada, se descartó la bandeja de entrada y se definió que era más productivo para el proceso, si la tolva se conectaba directamente con la trituradora, dado que se utiliza la fuerza gravedad para que el sustrato ingresado en la tolva por los pequeños agricultores, se deposite en la trituradora. Se definió acerca del sistema de agitación, que

se debe reemplazar el sistema de aspas por un sistema de biodiscos, debido a que como poseen una estructura similar a los abanicos, permiten mayor superficie de contacto que aumenta la cantidad de bacterias en los biodiscos. Además, el material de los biodiscos debe ser rugoso o no liso, para mejorar la adherencia de las bacterias a los biodiscos, por lo que tampoco se necesita de un repositorio de bacterias, porque las bacterias al poder multiplicarse al paso de un par de horas, sólo se necesitan ingresar en los biodiscos una cantidad de bacterias para que ellas de manera independiente se multipliquen y degraden la materia orgánica en forma global.

Cabe destacar que también se definió la incorporación de un reductor de velocidad por cada motor eléctrico, con la intención de poder regular las revoluciones por minuto según lo requerido, sobre todo en el sistema de biodiscos, dado que como se cuentan con bacterias anaeróbicas, no se debe oxigenar el sistema y esto se logra girando el sistema a bajas revoluciones por minuto (2-5 rpm). Se decidió de que el digestor adaptativo se debe ubicar en forma horizontal, debido a que si se ubica en forma vertical, por la fuerza de gravedad, el sustrato iba a descender de manera rápida y en menos de dos días, se encontraría gran parte del material en el fondo del digestor, y ya que las bacterias derivadas del rumen necesitan 20 días para degradar el material.

Se eliminó el segundo ducto, debido a que, en conversaciones con los investigadores, se definió que el ingreso del líquido con glucosa se realizará a través de una bomba de lodo. También se decidió incorporar en el contenedor un aceite térmico para calentar el sistema de serpentín y mantener la temperatura requerida, se escogió incorporar al sistema un panel fotovoltaico con la intención de generar energía y abastecer el funcionamiento de los motores eléctricos, la bomba de agua y de lodo y por último se agregan dos sistemas de arduinos en ambos extremos del digestor, con la intención de analizar distintos factores como temperatura, humedad, presión, entre otros, a través de sensores que se anexan a este sistema, procediendo a ingresar esta iteración a un sistema por el cual se obtuvo el diseño final del prototipo de la precámara celulolítica adaptativa que se presenta a continuación.

## Conclusión

La digestión anaeróbica si bien tiene bacterias que degradan la celulosa, es un proceso que demora mucho tiempo, y por lo tanto, es poco eficiente con materiales lignocelulósicos. En base al estudio realizado, planteamos que se puede añadir una etapa llamada degradación de la celulosa, que también es biológica y puede mejorar de manera significativa la digestión anaeróbica de residuos agropecuarios que incluyen material lignocelulósico. Se demostró que es factible juntar ambas etapas, ya que se trabaja con el mismo tipo de microorganismo, sus condiciones son muy similares, y además, es un proceso que se realiza en la naturaleza, específicamente en el estómago de los bovinos mediante las bacterias derivadas del rumen, por lo que, en este estudio se está replicando un fenómeno natural.

Como lo planteado incluye un sistema microbiológico, las bacterias normalmente tienen velocidades que no son elevadas, por lo tanto, a partir de desarrollos mecánicos tales como los sistemas de biodiscos, el sistema de moliendas, el control de temperatura, entre otros, son medios que se pueden incluir para mejorar la eficiencia de un proceso. En base a lo investigado, se demostró en el estudio que con la incorporación de estos elementos sí se puede aumentar la eficiencia del proceso en una mayor cantidad que cuando no se aplican tecnologías.

Dentro de las metodologías estudiadas, se entendió que las metodologías de innovación tales como el doble diamante, son metodologías que no solamente sirven para generar un prototipo, sino que brindan una ayuda para comprender de mejor manera el estudio de un problema, involucran iteraciones y conversaciones tanto con el cliente como entre los participantes del equipo de trabajo, para generar un producto que cumpla con todas las expectativas propuestas.

## Referencias

Baldini, A. Quemados de rastrojos agrícolas en el Barquillo. El Mercurio, 06 de Noviembre de 2018. pág. 6.  
 Stegmaier, F. ET AL (2019). XXIII Congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental AIDIS. Octubre, 2019. Santiago, Chile.  
 Taladriz, A. y Schwember. (2012). Revista N°46, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

