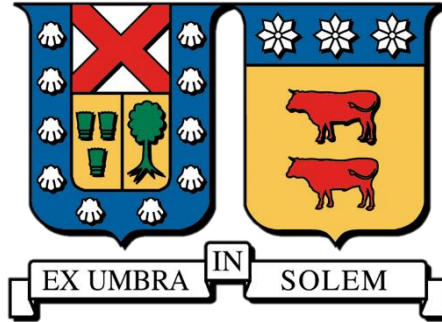


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
INGENIERÍA EN DISEÑO DE PRODUCTOS
VALPARAÍSO – CHILE



“SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACIÓN PARA UN BIORREACTOR DE
VERMICOMPOSTAJE”

RODRIGO FRANCISCO BRAVO CASTILLO
MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO EN DISEÑO DE PRODUCTOS
PHD. CHRISTOPHER NIKULIN CHANDIA
SEPTIEMBRE – 2021

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, Karen y Javiera, por todo el apoyo, la amistad y las anécdotas.

A los profesores Christopher Nikulin y Jorge Maggiolo, por haberme entregado conocimientos que me dieron un real significado para seguir el estudio de esta disciplina.

Al profesor Leonardo Madariaga, por presentarme la carrera en una etapa de incertidumbre y búsqueda.

Al Equipo de Lomterra y la profesora Gabriela López, por la confianza que tuvieron en mí para trabajar y desarrollar este proyecto.

DEDICATORIA

A Ivonne, Sergio, Sergio J, Budis y Tamy.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo expone el desarrollo de un sistema automatizado de monitoreo y evaluación, a nivel conceptual, para un biorreactor de flujo continuo de vermicompostaje. El sistema busca obtener mediciones integrales de humedad y temperatura dentro de un biorreactor, con el fin de facilitar la obtención de un vermicompost de alta calidad. Este trabajo nace del proyecto “Lomterra”, perteneciente al programa Semillero de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Según cifras actuales, en Chile una persona genera en promedio 1,26 kilos de residuos al día, siendo el país que más basura produce por persona en Sudamérica. A lo anterior se suma que sólo se reutiliza el 1% de la materia orgánica de estos residuos (MMA, 2020). Si bien las cifras son desalentadoras, en Chile cada vez son más las iniciativas que intentan construir el camino de la economía circular.

El vermicompostaje ha demostrado ser uno de los procesos más eficiente en la degradación de materia orgánica, pero a su vez, implica de ciertas variables que deben estar bajo control para obtener un resultado óptimo. Es por esto, que se propone un sistema que permite monitorear y evaluar las condiciones de temperatura y humedad dentro de un proceso de vermicompostaje. A lo largo del desarrollo de este trabajo, se describe la metodología con que se elige el mecanismo más idóneo para un sistema de monitoreo de estas características; además de la medición de las variables cuantitativas y el posterior procesamiento de datos.

ABSTRACT

The present work exposes the development of an automated monitoring and evaluation system, at a conceptual level, for a vermicomposting continuous flow bioreactor. The system seeks to obtain comprehensive humidity and temperature measurements within a bioreactor, in order to facilitate the obtaining of a high quality vermicompost. This work was born from the “Lomterra” project, which belongs to the Semillero program of the Federico Santa María Technical University.

According to current figures, in Chile an average person generates 1.26 kilos of waste per day, being the country that produces the most garbage per person in South America. In addition to that, it is added that only 1% of the organic matter in these wastes is reused (MMA, 2020). Although the figures are discouraging, in Chile more and more initiatives are trying to build the path of the circular economy.

Vermicomposting has proven to be one the most efficient process in the degradation of organic matter, but at the same time, it involves certain variables that must be under control to obtain an optimal result. This is why is proposed a system that allows monitoring and evaluating the temperature and humidity conditions within a vermicomposting process. Throughout the development of this work, the methodology with which the most suitable mechanism is chosen for a monitoring system of these characteristics is described; in addition to the measurement of quantitative variables and subsequent data processing.

GLOSARIO

Compost: es el producto obtenido a partir de diferentes materiales de origen orgánico, los cuales son sometidos a un proceso biológico controlado de oxidación denominado compostaje. Posee un aspecto terroso, libre de olores y de patógenos, es empleado como abono de fondo y como sustituto parcial o total de fertilizantes químicos.

Eisenia Fetida: o también llamada lombriz roja, es una especie de lombriz de tierra adaptada a la materia orgánica en descomposición. Estos gusanos están presentes en la vegetación en descomposición, el abono y el estiércol. Son epigeos, rara vez se encuentran en suelo.

Humus: Sustancia compuesta por productos orgánicos, de naturaleza coloidal, que proviene de la descomposición de los restos orgánicos (hongos y bacterias). Se caracteriza por su color negruzco debido a la gran cantidad de carbono que contiene. Se

encuentra principalmente en las partes altas de los suelos con actividad orgánica.

Materia orgánica: se refiere a la gran fuente de compuestos a base de carbono que se encuentran en entornos naturales y artificiales, terrestres y acuáticos. Es materia formada por compuestos orgánicos que provienen de restos de organismos como plantas y animales.

Microorganismo: es un ser vivo o un sistema biológico que solo puede visualizarse con el microscopio. Son organismos dotados de individualidad (unicelulares) que presentan, a diferencia de las plantas y los animales superiores, una organización biológica elemental.

Sensor: dispositivo que detecta el cambio en el entorno y responde a alguna salida en el otro sistema. Un sensor convierte un fenómeno físico en un voltaje analógico medible

Vermicompost: es el producto obtenido a través de un proceso de descomposición mediante lombrices, por lo general se utilizan lombrices rojas, lombrices blancas y otros tipos de gusanos de tierra. El resultado es una mezcla de vegetales y restos de comida, basura orgánica (papel, cartón, entre otros) y materia orgánica degradada por las lombrices (vermicast).

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
DEDICATORIA	2
RESUMEN EJECUTIVO	3
ABSTRACT	5
GLOSARIO	7
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABLAS	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS DEL PROYECTO	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos	18
ANTECEDENTES	20
1.1 Vermicultura y vermicompostaje	21
1.1.1 Eisenia Fetida	22
1.1.2 Compost tradicional v/s Vermicompost	22

1.2 Cuidado de las lombrices	23	1.3.3 Contenedores	29
1.2.1 Bedding	23	1.3.3.1 Contenedores alimentados	
1.2.2 Comida para lombrices	24	por la parte superior	29
1.2.3 Humedad	24	1.3.3.2 Contenedores apilados	30
1.2.4 Aireación	24	1.3.4 Reactores de flujo continuo	31
1.2.5 Control de temperatura	25	1.4 El valor del vermicompost	32
1.2.6 Otros parámetros		1.4.1 Desde la literatura	32
importantes	26	1.4.2 Resumen: El valor del	
1.2.7 Calculando tasa de reproducción	26	Vermicompost	33
1.3 Sistemas de		1.5 Riesgo medioambiental y	
Vermicompostaje	27	beneficios.	34
1.3.1 Hileras	27	1.5.1 Lombrices y medioambiente	34
1.3.1.1 Hileras de pila		1.5.2 Problemas en la calidad del agua	34
estática (lote)	27	1.5.3 Factores del cambio climático	35
1.3.1.2 Hileras alimentadas		1.5.4 Biodiversidad bajo tierra	35
por la parte superior	28		
1.3.2 Canal (flujo continuo)	29		

ESTADO DEL ARTE	36	METODOLOGIA	50
2.1 Desechos orgánicos		3.1 Primera etapa : Problemática y	
en Chile y el mundo	37	contexto de estudio	52
2.2 Compostaje y Vermicompostaje		3.2 Segunda etapa: Diseño de	
en Chile	40	estructuras y componentes	
2.3 Tecnologías implementadas		del sistema de	
en el procesamiento de		monitoreo	52
desechos orgánicos	41	3.3 Tercera etapa: Estructura	
2.3.1 Digestión Anaeróbica	41	de procesamiento de	
2.3.2 Compostaje	42	datos	53
2.3.2.1 Compostaje en contenedores	42	3.4 Cuarta etapa: Modelación	
2.3.2.2 Vermicompostaje	43	3D y algoritmo de	
2.4 Sistemas de control en		funcionamiento	54
Biorreactores	44	PROPUESTA	55
2.5 Desarrollo de sistemas		4.1 Problemática	56
de control automatizados		4.2 Contexto de estudio	58
para Vermicompostaje	45	4.3 Diseño de componentes	59

4.4 Modelo Hubka	63
4.4.1 Propuesta 1	64
4.4.2 Propuesta 2	65
4.4.3 Propuesta 3	65
4.4.4 Hubka	67
4.5 Sistema de evaluación y análisis de datos	69
4.6 Modelación 3D y algoritmo de funcionamiento	75
CONCLUSIONES Y TRABAJO	
FUTURO	82
REFERENCIAS	85
ANEXO	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Eisenia Fetida.....	22
Figura 2: Vermicompostaje Hileras	28
Figura 3: Vermicompostaje contenedores	30
Figura 4: Vermicompost contenedores apilados.....	30
Figura 5: Vermicompost reactor flujo continuo.....	32
Figura 6: Humus Origen.....	41
Figura 7: Esquema sistema control automatizado.....	47
Figura 8: Marco de referencia conceptual	48
Figura 9: Prototipo funcional automatizado	49
Figura 10: Interior reactor de flujo continuo	60
Figura 11: Sensor temperatura LM-35....	61
Figura 12: Sensor humedad YL-69.....	62
Figura 13: Sensor ultrasónico PING)))	62

Figura 14: Zonas A, B y C del biorreactor.....	64
Figura 15: Propuesta1.....	66
Figura 16: Propuesta 2.....	65
Figura 17: Propuesta 3.....	65
Figura 18: Gradiente de temperatura en el biorreactor.....	71
Figura 19: Marco de referencia estructura de monitoreo.....	75
Figura 20: Marco de referencia estructura de medición.....	75
Figura 21: Estado 0	75
Figura 22: Sensor distancia en estado 0	76
Figura 23: Marco de referencia estado 0.....	77
Figura 24: Herramienta midiendo temperatura y humedad.....	76
Figura 25: Marco de referencia estado 1.....	78
Figura 26: Marco de referencia estado 2.....	80

Figura 27: Sensor de distancia microcontrolador – estructura medición...	80
Figura 28; Marco de referencia estado 3.....	81
Figura 29: Marco de referencia estado 4.....	81
Figura 30: Dimensiones estructura de monitoreo.....	90
Figura 31: Contenedor de sensores y actuador lineal telescópico.....	91
Figura 32: Largo del actuador lineal telescópico.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Desarrollo modelo Hubka.....	68
Tabla 2: Asignación de ponderaciones a cada zona.....	72

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la cantidad de desechos sólidos en áreas urbanas durante un año alcanza la cifra aproximada de 2.000 millones de toneladas y se estima que más del 50% de estos desechos son de tipo orgánico. Las proyecciones calculan que para el año 2050 la cantidad de desechos sólidos serán de alrededor de 3.400 millones de toneladas, superando en dos veces la tasa de crecimiento proyectada de la población para ese mismo año (Banco Mundial, 2018).

En Chile, el 58% de los residuos de las casas corresponden a residuos de tipo orgánico, sin embargo, se aprovecha menos del 1% de ellos (Ministerio del Medio Ambiente, 2020). Lo anterior se contrapone a que Chile es el país que más basura genera por persona en toda Sudamérica, con un promedio diario de 1,26 Kg por persona. Las cifras dejan en evidencia la escasez de mecanismos e iniciativas desde

el mundo público y privado para combatir esta problemática.

Los procesos que más se destaca en el tratamiento de los residuos orgánicos es el compostaje tradicional y el vermicompostaje, este último ha demostrado tener mejores resultados (mayor cantidad de nutrientes) en un menor tiempo de trabajo. El hummus del vermicompost produce mejoras considerables en la preparación de suelo, producción de hortalizas, frutales y flores ornamentales. Las cifras de erosión, nutrientes y materia orgánica en los suelos de Chile son preocupantes, se estima que existe una superficie de 36,5 millones de hectáreas con algún grado de erosión (48,7% del territorio nacional), de los cuales 18,1 millones se encuentran en las categorías de erosión severa o muy severa (Flores et al, 2010). No obstante, se debe considerar que el desarrollo de la agricultura en Chile ha significado una gran pérdida de materia orgánica del suelo, especialmente

de carbono. Por estas razones, el vermicompostaje se transforma en una oportunidad para dar solución a estas contradicciones antes mencionadas.

El vermicompost es el resultado final de un proceso bioquímico que involucra distintas variables que necesitan ser controladas. Un vermicompost sin el debido cuidado de estas variables se transforma en algo inservible y difícil de mantener en el tiempo. En base a lo anterior, en este trabajo se propone desarrollar un sistema de monitoreo y análisis de las variables fundamentales en un biorreactor de vermicompostaje. Las variables que se abordan son la temperatura y la humedad de la materia orgánica dentro del biorreactor, ambas variables se deben mantener en un rango establecido para que el ambiente en que las lombrices degradan los desechos sea óptimo, además el posterior procesamiento de datos, obtenidos a través del sistema de monitoreo, tiene la función de entregar información de posición

y desplazamiento de las lombrices dentro del biorreactor con el objetivo de generar un vermicompost lo más estable y constante en el tiempo.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

A continuación, se describen los objetivos que serán abordados durante el desarrollo de este trabajo de título.

Objetivo general

Desarrollar a nivel conceptual un sistema de monitoreo y evaluación en un biorreactor de vermicompostaje, para lograr una estandarización en la producción de humus de lombrices.

Objetivos específicos

- 1.- Aplicar una metodología de diseño que acompañe el proceso de búsqueda de una solución óptima. Para así lograr los requerimientos necesarios del proceso de vermicompostaje.
- 2.- Diseñar un sistema que reduzca la interacción del ser humano con el biorreactor con la finalidad de evitar la exposición a un ambiente contaminado.

3.- Generar una solución adaptable a los biorreactores más utilizados en la industria del vermicompostaje.

4.- Generar un método de extracción y procesamiento de datos que permita obtener información confiable del estado y comportamiento de las lombrices dentro del biorreactor.

CAPÍTULO 01
ANTECEDENTES

CAPÍTULO 01

ANTECEDENTES

En esta sección se presenta información relevante con la intención de interiorizar al lector en la vermicultura y el vermicompost. Se abordan definiciones, procesos y herramientas que se utilizan en las áreas mencionadas anteriormente.

1.1 Vermicultura y Vermicompostaje.

Vermicultura es la cultura de las lombrices de tierra. Su objetivo es el aumento continuo del número de lombrices de manera de tener una cosecha sostenible.

Vermicompostaje es el proceso por el cual las lombrices son utilizadas para convertir la materia orgánica (usualmente desechos) en humus, más conocido como vermicompost. El objetivo es procesar esta materia orgánica en de la manera más rápida y eficiente.

A simple vista estos procesos pueden parecer similares, ya que el uso de lombrices está presente en ambos, la realidad es que tienen grandes diferencias. El objetivo del vermicompostaje es el procesamiento de la

materia orgánica a través de las lombrices, para esto es primordial tener un gran número de lombrices en un espacio determinado. Por el contrario, si el objetivo es aumentar el número de lombrices, la densidad tiene que ser lo suficientemente baja para que la reproducción sea óptima.

1.1.1 Eisenia Fetida.

Este tipo de lombriz (Figura 1) puede soportar un amplio rango de temperatura, entre los 0°C y los 35°C, y puede sobrevivir por un tiempo en un ambiente orgánico con temperatura bajo los 0°C, siempre y cuando pueda seguir alimentándose. Los huevos de crías pueden sobrevivir por varias semanas a temperaturas bajo los 0°C (Nova Scotia Agricultural College “NSAC”). Como la mayoría de la lombrices que habitan en los desechos, la Eisenia Fetida tiene la capacidad de reproducirse de manera muy rápida, esto debido a una necesidad evolutiva ya que el ambiente en el cual vive cambia constantemente. Todo lo anterior

hace que esta especie sea una de las mejores alternativas para trabajar en vermicompostaje exterior, de larga duración y en climas adversos.



FIGURA 1: Eisenia Fetida.

1.1.2 Compost tradicional v/s Vermicompost

El vermicompostaje ha demostrado tener mejores resultados que el compostaje tradicional, se ha visto que se obtiene un inoculador de mejor calidad en la producción de té de compost. Las lombrices tienen un

uso como fuente nutricional de alta calidad para los animales de las granjas (Munroe, 2007).

El vermicompost es un proceso más complejo que el compost tradicional, si bien puede ser más rápido, requiere de mucho más control. Requiere de más espacio ya que las lombrices viven solo en la superficie del material en el que estén inmersos. Las lombrices son más vulnerables que las bacterias del compost tradicional en materia de condiciones ambientales.

1.2 Cuidado de las lombrices.

Las lombrices composteras necesitan 5 cosas básicas:

- 1.- Un ambiente hospitalario para vivir, usualmente llamada “bedding”;
- 2.- Una fuente de alimentación.
- 3.- Humedad adecuada (mayor al 50% del contenido de agua en peso)

4.- Aireación adecuada.

5.- Protección a las temperaturas extremas.

1.2.1 Bedding

El Bedding es cualquier material que provee a las lombrices de un hábitat estable. Este hábitat debe tener las siguientes características.

- **Alta absorbencia.** El Bedding debe ser capaz de absorber y retener agua de buena manera para que las lombrices permanezcan vivas.

- **Buena porosidad.** Si el material es muy denso, o está muy compactado, el flujo de aire se verá reducido o simplemente no podrá hacerlo.

- **Bajo nivel proteico y/o contenido de nitrógeno (alto ratio Carbono: Nitrógeno).** Si bien las lombrices consumen el “Bedding” a medida que este se va descomponiendo, es muy importante que este proceso sea lento. Un alto ratio proteína/nitrógeno puede

dar como resultado una rápida degradación y está asociada a sobrecalentamiento, perjudicando el bienestar de las lombrices,

1.2.2 Comida para lombrices.

Bajo condiciones normales, las lombrices pueden comer más de su peso corporal en un día, pero por regla general deberían consumir la mitad de su peso corporal al día. Las lombrices comerán cualquier cosa que sea orgánica (de origen animal o vegetal), pero definitivamente prefieren algunas comidas por sobre otras. El excremento es la comida más común para alimentar a las lombrices, es considerado como la comida más natural de la Eisenia Fetida.

1.2.3 Humedad

El bedding usado debe tener la capacidad para aguantar una humedad suficiente si se quiere que las lombrices puedan cumplir sus funciones. Las lombrices respiran por su piel por lo que una humedad menor al 50% es peligrosa. Con la excepción de ambientes

con mucho calor o frío, nada va a perjudicar más la vida de las lombrices que una falta de la humedad adecuada.

El contenido de humedad ideal para el sistema de compostaje convencional es de un 45-60% (Rink et al, 1992). En contraste, el contenido de humedad para el vermicompostaje o Vermicultura se encuentra en un rango entre los 70-90%. Según ciertas investigaciones se ha concluido que una humedad superior al 80% es lo ideal para los fines de la Vermicultura, mientras que para el vermicompostaje es recomendable operar entre el rango de los 70-80%.

1.2.4 Aireación

Las lombrices no pueden sobrevivir en condiciones anaeróbicas. Cuando factores como una alta concentración de grasas en la comida o exceso de humedad combinada con una aireación deficiente, aumenta la posibilidad de que el sistema se vuelva

anaeróbico, por ende, perjudicial para las lombrices. Esto matará a las lombrices muy rápidamente. En estas condiciones, las lombrices no solo mueren por falta de oxígeno, a lo anterior se le suma la generación de sustancias tóxicas (p.ej., amoníaco) creado por diferentes microbios que se generan producto de estas condiciones.

1.2.5 Control de temperatura

El control de la temperatura entre los rangos tolerables de las lombrices es de vital importancia tanto en la Vermicultura como en el vermicompostaje. La necesidad de sistema de calefacción o enfriamiento no es necesario, mantener los rangos de temperatura se puede lograr con muy baja tecnología.

- **Bajas temperaturas.** La lombriz *Eisenia* puede sobrevivir a temperaturas tan bajas como los 0°C, pero no se reproducen a temperaturas menores a 10°C y tampoco

consumen mucho alimento por debajo de esa misma temperatura. Se considera necesario mantener la temperatura por lo menos sobre los 10°C, de preferencia 15°C para una real eficiencia en el vermicompostaje y sobre los 15°C, 20°C de preferencia para las operaciones de Vermicultura.

- **Efectos de temperatura bajo 0°C.** *Eisenia* puede sobrevivir en bedding que están bajo los cero grados, las lombrices solo morirán si no son capaces de consumir alimento en estas condiciones. Según estudios los huevos de las lombrices resisten por largos periodos a estas temperaturas siguiendo vigentes.

- **Altas temperaturas.** Las lombrices composteras pueden sobrevivir a temperaturas alrededor de los 35°C, pero prefieren el rango de los 15°C - 30°C. Sobre los 35°C las lombrices abandonarán la zona en la que están, y en caso de no poder estas morirán. Por lo general, a temperaturas

templadas (sobre 20°C) la reproducción aumenta.

- **Respuesta de las lombrices a diferenciales de temperatura.** Las lombrices composteras se distribuirán a lo largo y ancho del material en el que se encuentran, en función de los gradientes de temperatura. Dependerá del método utilizado (interior o exterior) para establecer los rangos en que las lombrices se están posicionando.

1.2.6 Otros parámetro importantes

PH. Las lombrices sobreviven a rango de pH entre 5 y 9 (Edwards, 1998). La mayoría de los expertos creen que las lombrices prefieren un pH de 7 o levemente superior. Otros investigadores descubrieron que el rango de 7.5 a 8.0 era el óptimo (GEORG, 2004). En general, el pH de los bedding de lombrices tiende a decaer con el tiempo.

- **Contenido de sal.** Las lombrices son muy sensibles a la sal, de preferencia de

recomienda un contenido de sal menor a 0.5% (Gunadi et al., 2002). Si se está usando algas proveniente de aguas saladas como comida, esta debe ser lavada primero para sacar la mayor cantidad de sal superficial. De manera similar. Muchos tipos de excremento tienen un alto contenido de sales solubles (sobre un 8%). Esto no suele ser un problema si el excremento es usado como comida, debido a que al estar en la superficie es más probable que se diluya con la humedad de los demás elementos. Si el excremento es usado como bedding lo ideal es filtrarlo para reducir el su contenido en sal. Esto se consigue simplemente enjuagándolo por un periodo de tiempo (Gaddie, 1975).

1.2.7 Calculando tasas de reproducción.

Se puede esperar que la población de lombrices se duplique cada 60 a 90 días, pero solo si se cumplen las siguientes condiciones.

- Comida adecuada. Debe ser de manera continua.
- Buen sistema de aireación con contenido de humedad entre 70-90%;
- Temperatura entre los 15 y 30°C
- Densidad de población* inicial mayor a 2.5 kg/m² pero no mayor a 5 kg/m².

* Se refiere al peso inicial de lombrices por unidad de área del bedding.

1.3. Sistemas de Vermicompostaje

Existen tres tipos de sistemas básicos de sistemas de vermicompostaje: **hileras, contenedores y reactores de flujo continuo**. Cada uno de estos posee ciertas variantes. Las hileras y los contenedores pueden ambos ser en lotes o de sistema continuo.

La diferencia de la variante lote y flujo continuo es que la primera consiste en que el bedding y la comida son mezclados, luego de esto se incorporan las lombrices y se deja

que estas hagan todo el trabajo, no se interfiere más hasta que el proceso se haya completado. El sistema de flujo continuo consiste en que las lombrices se incorporan a un bedding, para después ir incorporando el alimento de manera incremental a medida que se va consumiendo.

1.3.1 Hileras

El vermicompostaje en hileras (Figura 2) puede ser llevado a cabo de diferentes maneras. Las tres formas más comunes son:

1.3.1.1 Hileras de pila estática (lote)

Son básicamente lotes de bedding y alimento para lombrices mezclados. Se inoculan con lombrices y se espera hasta que el proceso se complete. No deben exceder el metro de altura.

Los siguientes puntos son importantes a tener en consideración para este sistema.

1. A pesar de que las hileras no necesitan ser mezcladas durante el

- proceso, estas sí deben ser regadas con agua o cubiertas.
2. En zonas de frío extremo se deben hacer pruebas a menor escala en un comienzo.
 3. Incorporar comida para lombrices altas en nitrógeno.
 4. Extraer las lombrices del producto final.



FIGURA 2: Vermicompostaje mediante el método de hileras.

1.3.1.2 Hileras alimentadas por la parte superior (flujo continuo)

Similar al sistema descrito anteriormente con la diferencia de que no se mezcla el

bedding con el alimento de las lombrices y no se colocan en lotes. Se intenta hacer un sistema de flujo continuo; es decir, primero se coloca el bedding, luego se inocula con lombrices y por último se colocan capas de alimento de menos de 10 cm de altura. Las lombrices tienden a consumir el alimento desde la unión entre el bedding y el alimento. A medida que pasa el tiempo se va formando una hilera con capas. Al fondo está el producto terminado, arriba de este un bedding a medio consumir y sobre este comida nueva de lombrices. La ventaja de este sistema es el mayor control de operación, además de poder modificar las variables que inciden en un buen producto final.

La cosecha de este método se hace removiendo los primeros 10-20 cm, este material contendrá la mayoría de las lombrices. El material sobrante el vermicompost, junto con algo de bedding a medio procesar.

1.3.2 Canal (Flujo continuo)

El vermicompost tipo canal es una variación de las hileras alimentadas por la parte superior. Una carga inicial de lombrices es añadida a una estructura tipo corral (3 lados) de no más de 1 metro de altura. Las paredes de la estructura pueden ser de hormigón, madera o de fardos de paja o heno. Alimento fresco para lombrices es añadido por la parte sin pared, las lombrices siguen la comida fresca a través del canal dejando el material procesado atrás. Cuando el material a llegado al final del extremo abierto, el material procesado es sacado retirando la parte de atrás del corral.

Utilizando este sistema, no se requiere retirar a las lombrices del sistema, ya que estas mismas se mueven a medida que se incorpora más comida fresca. Durante los meses más fríos, es recomendable colocar una capa de paja o heno en la cara activa de la pared de contención del corral para aislar la temperatura. La estructura tipo corral

puede ser de cualquier ancho, pero se aconseja que sea de una medida lo suficientemente ancha para poder hacer controles y ajustes de humedad y pH. Un ancho de 2 metros es lo ideal para este tipo de estructuras. La ventaja de este sistema por sobre el anterior es que brinda un mayor grado de aislación térmica y retención de humedad.

1.3.3 Contenedores

1.3.3.1 Contenedores alimentados por la parte superior

Trabaja de manera muy similar al de tipo hilera. La principal diferencia es que el de tipo contenedor está contenido dentro de 4 paredes y un suelo (Figura 3), también suelen protegerse al interior de recintos cerrados, como galpones.



FIGURA 3: Vermicompostaje método de contenedores.

La cosecha en este tipo de vermicompostaje se logra a través de migración horizontal, se colocan dos contenedores juntos, uno con lombrices y material totalmente procesado, se deja de incorporar alimento a este contenedor y se empieza a colocar alimento en el contenedor adyacente, luego se espera a que se produzca la migración para retirar el contenedor inicial con el material procesado.

1.3.3.2 Contenedores apilados (lotes o flujo continuo)

Una de las mayores desventajas del sistema de contenedores (Figura 4) es la cantidad de

superficie que requiere para funcionar. Si bien, esto también aplica para los sistemas de hileras y de canal, estos se últimos se desarrollan en exterior, o cuál no es tan costoso como un sistema interior. La alternativa de contenedores intenta aprovechar el espacio de mejor manera, agregando la dimensión vertical al sistema. Los contenedores deben ser lo suficientemente pequeños para poder levantarlos, ya sea a mano o con montacargas, cuando están llenos de material húmedo.



FIGURA 4: Vermicompostaje método contenedores apilados.

El tiempo que se deja para procesar el material completamente es de 6 meses, la población de lombrices durante este tiempo crece aproximadamente 3 veces en condiciones ideales.

La mayor desventaja del sistema de contenedores apilados es el costo inicial de implementación. Requiere de un lugar protegido, contenedores, un mezclador de bedding y alimento, y maquinaria para apilar los contenedores. En una escala menor esto puede hacerse a mano. Otra desventaja es al momento de cosechar el producto final debido a que las lombrices están mezcladas con este, por lo que se necesitan un sistema para separarlo, puede ser con un cosechador o con algún método intermedio (p. ej. Migración).

1.3.4 Reactores de flujo continuo

Este concepto fue desarrollado por el Dr. Clive Edwards en los años 80. Ha sido

adoptado y modificado por numerosas empresas. El sistema consiste en una caja rectangular de no más de 3 metros de ancho, elevada del suelo (Figura 5). El material es añadido por la parte superior y retirado por una rejilla en la parte inferior, ayudado por una barra de corte. El término “Flujo continuo” se refiere a que las lombrices nunca ven interrumpida su labor, ya que las lombrices comen en la superficie y depositan sus desechos en la parte inferior del bedding. Clive Edwards ha declarado que con un manejo apropiado de una unidad de flujo continuo de 100 m² puede, aproximadamente, procesar 2 a 3 toneladas diarias de desechos orgánicos (Bogdanov, 1999).



FIGURA 5: Vermicompostaje, reactor flujo continuo.

Según distintas fuentes, unidades con sistema de flujo continuo son los sistemas de vermicompostaje más eficientes disponibles hoy en día.

1.4 El valor del Vermicompost

1.4.1 Desde la literatura

Vermicompost, como el compost convencional, provee de muchos beneficios al suelo de la agricultura, incluyendo la habilidad de retener humedad, capacidad de contener mejores nutrientes, mejor estructura del suelo, y mayores niveles de actividad microbiana. Según la literatura, el

vermicompost destaca por sobre el compost tradicional debido a lo siguiente:

- Nivel de nutrientes disponibles para las plantas. Atiyeh et al. (2000) descubrieron que el compost es alto en amoníaco, mientras que el vermicompost tiende a ser alto en nitratos, lo cual es una buena forma para las plantas de obtener nitrógeno. De manera similar, trabajos en NSAC por Hammermeister et al. (2004) indicaron que “Excremento que fue parte de un proceso de vermicompostaje poseía mayor nivel de nitrógeno que el excremento usado en compostaje tradicional, en términos de peso”. Estudios posteriores mostraron que la tasa de suministro de numerosos nutrientes, incluyendo P, K, S y Mg, eran mayores en vermicompost en vez de compost tradicional.

- Nivel de microorganismos beneficiosos. Se estima que el vermicompost es 1000 veces más activo a nivel de microorganismos que el compost

convencional, aunque esa cifra no es siempre alcanzable. (Subler et al., 1998).

- Habilidad para estimular el crecimiento de plantas. Muchos investigadores han descubierto que el vermicompost estimula de mayor manera el crecimiento de plantas incluso cuando las plantas están recibiendo una nutrición apropiada. Atiyeh et al (2002) revisó una gran cantidad de literatura que describe este fenómeno. El autor señala que las investigaciones demuestran consistencia en que el vermicompostaje de desechos orgánicos tiene un efecto beneficioso en el crecimiento de plantas, independiente de las condiciones del suelo y/o ambientales. Algunos autores han reportado (p.ej., Arancon, 2004) que el máximo de beneficio del vermicompost se obtiene cuando constituye entre un 10 y un 40% del medio de cultivo.

- Habilidad para suprimir enfermedades. Existe evidencia anecdótica considerable en los años recientes con respecto a la

habilidad del vermicompost de proteger a las plantas de varias enfermedades. La teoría detrás de esto afirma que la gran cantidad de microorganismos en el vermicompost protege a la plantas debido a la competencia entre patógenos por los recursos disponibles, también los microorganismos bloquean el acceso a las raíces de las plantas al ocupar el espacio disponible.

- Habilidad para repeler plagas. Las investigaciones en esta área son bastante recientes y los resultados a la fecha han presentado inconsistencia. Sin embargo, pareciera haber una relación entre el vermicompost y la inexistencia de plagas en presencia de vermicompost.

1.4.2 Resumen: El valor del Vermicompost

Agricultores consideran que el vermicompost es siete veces más ricos en nutrientes para las plantas que el compost tradicional por lo que solo se necesita 1/7 de

la cantidad de requerida (Pajon, sin fecha). La literatura es bastante consistente en registrar los beneficios de usar vermicompostaje, desde el crecimiento de las cosechas como la disminución del desgaste del suelo como también el control de plagas.

1.5 Riesgo medioambiental y beneficios

1.5.1 Lombrices y el medio ambiente

Aristóteles llamaba a las lombrices “los intestinos de la tierra” y Charles Darwin escribió un libro sobre las lombrices y su comportamiento, en el cuál declaró que es probable que nunca haya habido una criatura que haya cumplido un rol tan importante para la historia de la vida en la tierra (Bogdanov, 1996). No hay dudas en que la relación entre los humanos y las lombrices es de vital importancia, además de ser nutrida y expandida constantemente. Algunas áreas importantes en que la ayuda

de las lombrices puede beneficiar la vida del ser humano son las siguientes.

1.5.2 Problemas en la calidad del agua

Una de las preocupaciones con el vermicompostaje era que el proceso no eliminaba potenciales agentes patógenos dañinos, esto debido a que el vermicompostaje no alcanza temperaturas internas tan elevadas como el compost tradicional. Sin embargo, en años recientes, se ha demostrado con evidencia sólida que las lombrices logran eliminar agentes patógenos potencialmente peligrosos, la manera en que lo hacen es aún desconocida. Investigadores descubrieron que las lombrices destruyen los patógenos dentro de ellos, por lo que eliminan un material libre de patógenos (Appelhof, 2003).

Estos descubrimientos tienen implicancias que van más allá de la protección de la

calidad del agua durante el Vermicompost, que de todas formas es importante. Pero también sugieren que el vermicompost esparcido en los campos de cultivo no provocará contaminación de aguas subterráneas o aguas en superficie.

1.5.3 Factores del cambio climático

Uno de los mayores beneficios tanto del compostaje como del vermicompostaje ocurre a través de la encapsulación del carbono. Este proceso consiste en encerrar el carbono en materia orgánica y otros organismos que están dentro de la tierra. Debido a la estabilidad del compost de todos los tipos, más carbono es retenido en la tierra que si estuviera solo como excremento u otros fertilizantes inorgánicos. El constante uso de compost o vermicompost aumenta gradualmente el nivel de carbono en la tierra.

1.5.4 Biodiversidad bajo tierra

La biodiversidad en la tierra está decayendo de manera rápida, es más, la comunidad

científica teme que estemos cerca de un proceso de extinción masiva.

Las lombrices de tierra cumplen un rol fundamental para contrarrestar la pérdida de biodiversidad. Las lombrices incrementan el número y tipos de microbios en la tierra creando las condiciones bajo las cuales estas criaturas pueden prosperar y multiplicarse.

CAPÍTULO 02
ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 02

ESTADO DEL ARTE

En esta sección se expondrá la situación actual de los desechos orgánicos en Chile y el mundo, el nivel de desarrollo del compostaje y vermicompostaje en el país, tecnologías implementadas en el procesamiento de desechos orgánicos; además de los estudios y conclusiones que se han desarrollado hasta la fecha en materia de sistemas de control automatizados para vermicompostaje. Los puntos fuertes y las debilidades de estos avances sentarán las bases de la propuesta de este trabajo.

2.1 Desechos orgánicos en Chile y el mundo.

En la última década, la preocupación por la cantidad de desechos orgánicos que genera el ser humano ha ido en considerable aumento. Esto debido a que, por primera vez en la historia de la humanidad, más del 50% de la población mundial vive en ciudades y se espera que para el 2050 la cifra llegue al 70%; cifra que pondrá presión a la

infraestructura de los países para lidiar con los servicios de tratamientos de desechos (Asociación mundial de Biogas, 2018).

Países como Noruega, Italia y Nueva Zelanda se encuentran estudiando y aplicando medidas en diferentes ciudades para la reducción y el tratamiento de desechos. Una de las primeras aproximaciones a la problemática de la generación de desechos es intentar prevenir el desperdicio de alimentos que posteriormente se convertirá en desechos. Para la producción de alimentos se requiere de diversos recursos naturales; como el agua, el carbono y una gran variedad de nutrientes se desperdician si no son consumidos o son parte de un mal tratamiento de desechos; esto último puede provocar un aumento en la producción de gases de efecto invernadero, contaminación de aguas y una mayor cantidad de vectores de enfermedades para la población; además del impacto económico para contrarrestar

las consecuencias que se van generando. Entre las medidas para la prevención del desperdicio de materia orgánica destinado al consumo humano, se encuentra la identificación de todas las etapas de la cadena de suministro de alimentos, estas etapas son: producción, procesamiento, distribución, venta y consumo. Dentro de las etapas antes mencionadas, se estableció un sistema de jerarquización creado por el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP), que define las acciones más importantes para reducir la cantidad de materia orgánica como desecho. La acción más importante, según este sistema, es la prevención; principalmente en materia de producción de alimentos. Empresas dedicadas a la producción de alimentos se ven enfrentadas a, sobreproducción debido a acuerdos contractuales, gran cantidad de elementos no comestibles dentro del proceso de producción y, por último, producción que no cumple con los estándares de calidad y/o apariencia. Una

mayor optimización en los niveles de producción y procesos internos generaría un impacto positivo en la cantidad de desechos generados por conceptos de sobre oferta. El siguiente nivel en la escala de jerarquización es la optimización; esta acción contempla destinar los desechos para que sean consumidos tanto por personas como por animales; es decir, hacer llegar alimentos en buen estado a personas más necesitadas (Banco de alimentos), o destinarla como alimento para animales. Por último, se encuentra el nivel en donde el alimento es desecho, las acciones a realizar son las de: reciclaje, en esta existen procesos como el compostaje y vermicompostaje; recuperación, se procede incinerar los desechos para la obtención de energía; desecho, en esta etapa los desechos quedan en vertederos, desaprovechando la recuperación de nutrientes y/o energía.

El año 2020, el Ministerio del Medio Ambiente elaboró una estrategia nacional

para la reducción de los desechos orgánicos, fijando el año 2040 como meta para llegar a un 66% de reutilización de residuos orgánicos municipales (actualmente inferior al 1%). El sistema actual es, casi en su totalidad, lineal; los productos se hacen, consumen y desechan generando un impacto ambiental múltiple, como, por ejemplo; la proliferación de vectores sanitarios (moscas, aves, ratones), la generación de lixiviados, olores molestos y gases de efecto invernadero (GEI), principalmente metano.

Para el año 2030 el plan espera lograr revalorizar un 30% de los residuos orgánicos municipales, contar con 500.000 familias y 5.000 recintos educacionales que realicen compostaje y/o vermicompostaje, disponer de parques urbanos que procesen sus desechos orgánicos; además de lograr que un 50% de las instituciones públicas separen y valoricen sus desechos orgánicos. Las metas son ambiciosas en el plazo definido

por la autoridad, y se aprecia que la ciudadanía tiene un rol muy activo; sin embargo, la participación y cultura del reciclaje en el país es escasa. El plan pretende impulsar la inversión pública con el fin de apoyar el rol de los municipios en estas tareas; en este punto la propuesta del gobierno señala que asesorará a Municipalidades y Gobiernos regionales en materia de revalorización de desechos, invitando al sector privado a aportar con conocimientos técnicos asociados al diseño y ejecución de proyectos sobre gestión sostenible de residuos. Con respecto a lo anterior, existe una clara oportunidad y necesidad en profundizar el conocimiento técnico del tratamiento de residuos orgánicos, todas las iniciativas que vayan en esta dirección tendrán el interés de las instituciones públicas en los próximos 20 años.

2.2 Compostaje y Vermicompostaje en Chile.

En Chile, estos procesos avanzan a pequeños pasos y su impacto se ve de forma más localizada (barrios y comunas). Distintas empresas ofrecen servicios de asesorías y/o tratamiento de residuos orgánicos, orientadas principalmente al compostaje; empresas, por ejemplo, como VOLTA, que inició sus servicios en 2014 y cuenta con tres plantas de tratamientos en el país para desarrollar actividades de gestión, recolección y valorización de residuos. El compostaje tradicional tiene muchas más facilidades para su producción, el nivel de maquinaria, el bajo nivel de control para su obtención hace que sea la primera alternativa a considerar para las empresas de tratamiento de residuos.

En cuanto a Vermicompostaje, en Chile la actividad se concentra en pequeños productores de vermicompost que trabajan con poca cantidad (menor a 1.000 toneladas

al año); sin embargo una de las empresas que procesa la mayor cantidad de toneladas al año es Humus-Origen, ubicada en la comuna de Curicó, séptima región. Esta empresa utiliza un sistema de Vermicompostaje por hileras (Figura 6), la actividad es casi en su totalidad mecánica, es decir, se airea el vermicompost mezclándolo a través de palas mecánicas; al igual que su remoción. El sistema por hileras tiende a ser menos preciso ya que estas se encuentran al aire libre en donde variables como la humedad y la temperatura tienden a ser más difíciles de controlar debido a las condiciones ambientales, por lo que la calidad del compost tiende a no ser estándar. Para lograr lo anterior se quieren de sistemas con un mayor control de las condiciones ambientales y los demás factores que inciden en el comportamiento de las lombrices.



FIGURA 6: Proceso de hilera de Humus-Origen.

2.3 Tecnologías implementadas en el procesamiento de desechos orgánicos.

2.3.1 Digestión anaeróbica

Corresponde a una serie de procesos biológicos en el cual microorganismos digieren restos de origen animal o vegetal en contenedores cerrado, produciendo biogas, que es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros gases. El material orgánico sobrante, conocido como digestato, es alto en materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno, fosfato y potasa. La principal diferencia entre la digestión anaeróbica y el compostaje es que la digestión anaeróbica ocurre dentro de contenedores sin la presencia de oxígeno, mientras que el

compostaje requiere de la presencia de oxígeno.

El proceso dentro de un contenedor de digestión anaeróbica consiste en la descomposición de elementos orgánicos a través de una combinación de muchos tipos de bacterias y arqueas (microorganismos). La biomasa añadida al digestor en un comienzo se descompone en azúcares, aminoácidos y ácidos grasos; luego estos elementos son fermentados obteniendo alcoholes y ácidos grasos volátiles seguido de su conversión en hidrógeno, dióxido de carbono y amoníaco; por último, la arquea metanógena produce biogas del ácido acético y el carbono.

Los beneficios de este proceso son, generar una carga base de energía de manera sustentable, reducir la dependencia de energías provenientes de combustibles fósiles, reducción de gases efecto invernadero, captura de biogás de vertederos evitando emisiones de metano,

sustitución de fertilizantes sintéticos por biofertilizante, Mejorar la autosuficiencia y sostenibilidad de las industrias mediante la extracción de energía de sus propios residuos y usándolos para la autogeneración de electricidad y / o calor, entre otros.

2.3.2 Compostaje

El compostaje es un proceso aeróbico que descompone material orgánico en un sustrato rico en nutrientes. Tipos de compostaje incluye compostaje tradicional, vermicompostaje, compostaje en hileras aireadas, estático aireado en pilas y compostaje en recipientes. En esta sección se describirán los más utilizados actual en el mundo; que son el compostaje en contenedores y el vermicompostaje.

2.3.2.1 Compostaje en contenedores.

Este proceso se usa para tratar mezclas de desechos de alimentos y jardines, pero también se puede aplicar a fango, desechos agrícolas (estiércol, residuos de cultivos) y

subproductos agroindustriales. El compostaje en recipientes utiliza un tambor, silo, zanja o cámara revestida de concreto, o una estructura similar para contener el residuos biológicos a temperatura, humedad y nivel de oxígeno controlados. Es adecuado para grandes volúmenes de residuos, lo que lo hace muy conveniente para municipios o gobiernos locales.

El proceso conta de dos etapas, en la primera etapa se mezclan los desperdicios de alimentos y desechos de jardinería. Luego se trituran a un tamaño uniforme y se colocan en lo que se conoce como la primera "barrera", que será un túnel o cámara según el sistema utilizado. Después de la primera etapa (que puede durar entre una y tres semanas), el material se transfiere a la segunda "barrera", donde el proceso de compostaje continúa, generalmente por una duración similar. Procesando en dos etapas asegura que todas las partes de la masa de compostaje alcancen la temperatura

requerida. El nivel de oxígeno, la humedad y la temperatura se controlan cuidadosamente durante ambas etapas de compostaje para garantizar que el material esté en buenas condiciones, específicamente que el material alcance una temperatura definida durante un cierto período, generalmente hasta 70 ° C por uno o dos días. Una vez que se completa el proceso, el compost se deja madurar en un hilera abierta o un área cerrada durante aproximadamente 10-14 semanas para asegurar la estabilización.

2.3.2.2 Vermicompostaje.

Actualmente uno de los sistemas más utilizados por su eficiencia es el vermicompostaje de flujo continuo. Consiste en una estructura rígida, por lo general un contenedor de tipo rectangular que está elevado del suelo, la parte superior está descubierta para ir incorporando los desechos orgánicos que son el alimento de las lombrices en la parte inferior del contenedor se coloca una rejilla que es por

donde se extrae el vermicompost mediante una barra de corte. Este flujo de abajo hacia arriba requiere de un recipiente o contenedor que permita la recolección desde el fondo para que las lombrices que trabajan en las capas superiores del contenedor permanezcan inalterables, además de contenedores extraíbles que permiten la migración por arriba.

Los beneficios del vermicompostaje de flujo continuo es la facilidad de separar el hummus de las lombrices, esto debido al diseño del contenedor y su sistema de extracción del sustrato; un contenedor de flujo continuo puede ahorrar mucho trabajo, ya que el contenedor no debería tener que vaciarse y reiniciarse como lo hacen otros sistemas; otra ventaja que tiene el sistema continuo, por sobre el sistema de hileras, es la capacidad de mantener condiciones constantes, un sistema de vermicompostaje expuesto a los elementos y en contacto con el suelo está sujeto a condiciones climáticas

variables, precipitaciones, infestación de plagas; por último un contenedor de lombrices de flujo continuo permite cosechar sin perturbar el ecosistema que se encuentra en funcionamiento.

Comparando ambos procesos se aprecian diferencias en el tiempo en que se procesan los residuos orgánicos, el compost tradicional demora alrededor de 7 meses, mientras que el vermicompost demora 3 meses aproximadamente; el hummus de lombrices se valoriza a un precio diez veces mayor que el compost tradicional; no requiere de aireación mecánica ya que las lombrices al moverse por el material permiten la circulación de aire.

2.4 Sistemas de control en biorreactores

Un ambiente controlado se crea a partir de sistemas de control electrónico, empleando señales eléctricas que interactúan con los actuadores del biorreactor, de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la

velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción (Chaparro D, 2017).

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados teóricamente verdaderos (García, 2014).

2.5 Desarrollo de sistemas de control automatizados para vermicompostaje.

Hoy en día se están desarrollando una gran variedad de tecnologías relacionadas con el procesamiento de desechos. Sin embargo, muchas de estas tienden a la acumulación de diferentes componentes nocivos que terminan nuevamente en la naturaleza. Es por esto, que las nuevas tecnologías están orientadas al total uso y procesamiento del material para así transformarlo un producto beneficioso. Lo anterior se logra

principalmente con el control de las condiciones en que esta materia orgánica evoluciona al producto final deseado.

La robótica y la automatización son caminos que intentan dar solución al control de las distintas variables que se ven involucradas. Los desechos de materia orgánica y las lombrices de tierra son los principales actores que dan vida al procesamiento de estos desechos; la robótica y la automatización interactúan con estos componentes para medir y monitorear la interacción entre ambos para así poder corregir alguna situación no deseada.

El año 2018, investigadores de la Universidad Técnica Estatal de Volgogrado desarrollaron un sistema de monitoreo automático de temperatura y humedad (Volkov et al, 2020) Definieron los componentes que tendría un biorreactor ideal que pudiese controlar la temperatura y la humedad, además desarrollaron un esquema del sistema robótico que incluye

las unidades de control, sensores y dispositivos.

Para el estudio del control de la temperatura, proponen un sistema de aire comprimido a una temperatura de 55°C suministrado a una presión de 1.5 atm para llegar a una temperatura óptima de operación. Para el control de la humedad realizan mediciones para concluir que hay una distribución uniforme a lo largo y ancho de la muestra; que fluctúa entre un 30 – 40% de humedad.

Los componentes (Figura 7) de este sistema automatizado constan de un contenedor (1), cuyas paredes son de hormigón. Un dispositivo de suministro de aire (2), un compresor (3) con receptor (4), válvula eléctrica principal (5) y la unidad de preparación de aire (6). El biorreactor (1) contiene un área de procesamiento de la materia prima (7), en la parte inferior un sistema de tuberías (8) con válvulas eléctricas distributivas (9) y dispositivos de medición de aire con los emisores

compensados (10) . El robot (11) está ubicado sobre rieles (12) , que están instalados en las paredes longitudinales del biorreactor (1), y contiene una unidad de control (13). También contiene un dispositivo de medición de temperatura (14), que está montado en una sonda (15). Este dispositivo (14) consta de al menos tres sensores de calor, que se encuentran equidistantes entre sí a lo largo de toda la sonda, que se instala con posibilidad de un movimiento transversal a lo largo del puente (16) y movimiento vertical, con la ayuda del dispositivo de desplazamiento vertical (17). Un anillo (18) se instala en el dispositivo de desplazamiento vertical para la limpieza de la sonda.

El dispositivo sonda tiene una altura constante, esto en un caso práctico no sería de utilidad debido a que la altura del hummus es variable. El nivel de automatización desarrollado es alto y va en la dirección de lograr una total

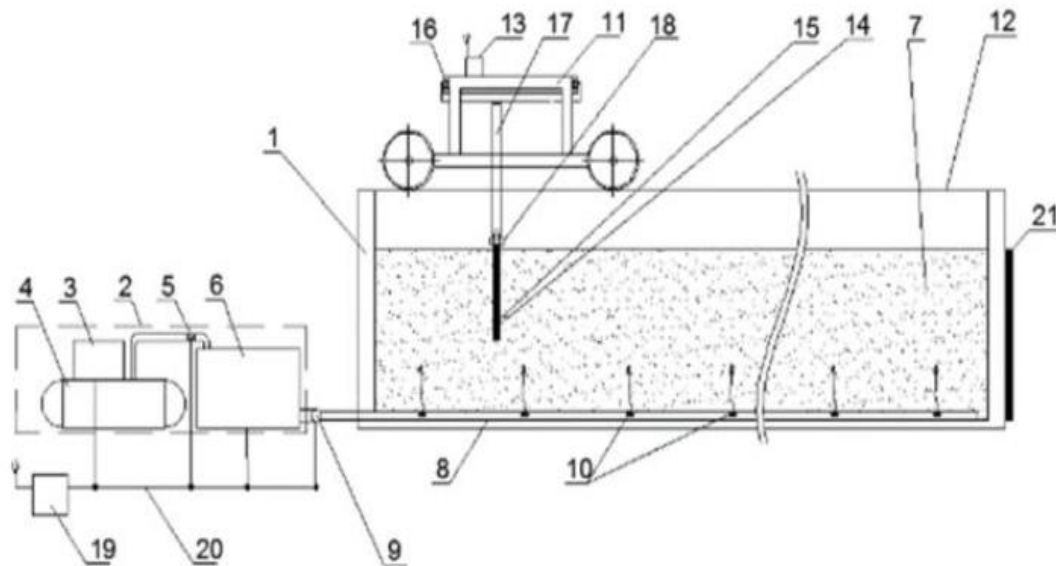


FIGURA 7: Esquema de sistema de control automatizado de vermicompostaje.

independencia operacional lo que provocaría bajos costos laborales de personal. Esto aumenta la velocidad del procesamiento de residuos orgánicos y la eficiencia económica del proceso.

Otra investigación reciente ha sido desarrollada en la Universidad Estatal Don Honorio Ventura de Filipinas. Este

trabajo consiste en un sistema automatizado de vermicompost. El diseño (Figura 8) se basa en cuatro subsistemas: riego, red de sensores, migración de lombrices y sistema de comunicación para minimizar la intervención humana en la obtención de vermicompost. El estudio funciona en base a los microcontroladores Arduino uno y Arduino mega, un teléfono Android y una pantalla LCD para monitoreo.

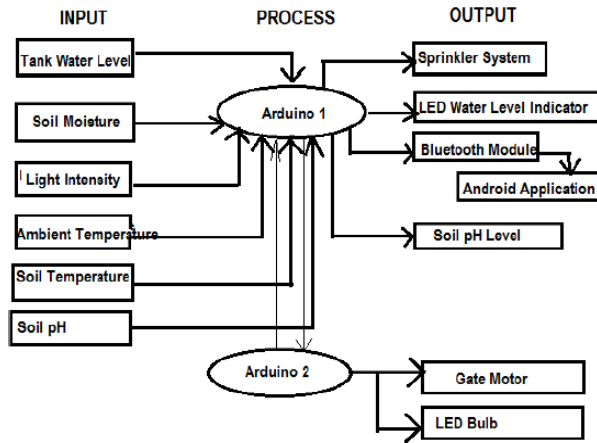


FIGURA 8: Marco de referencia conceptual.

Los autores (Macabuhay et al, 2016) consideran la humedad del suelo como variable principal seguidas de la temperatura del sustrato, la intensidad de la luz y los niveles de pH. Para esto el proyecto se utiliza dos microcontroladores Arduino. Un Arduino se utiliza para recibir señales de las redes de sensores de entrada y procesa estas señales para activar la salida deseada. El otro Arduino cumple la función de temporizador para la puerta de los contenedores de lombrices. Se establece una comunicación simplex entre los dos

Arduino para coordinar el tiempo programado para abrir y cerrar la puerta del contenedor de lombrices.

Los resultados del ensayo de la muestra de Vermicast del sistema automatizado son: pH 5,36; Nitrógeno 1,97%; Fósforo 0,80%; Potasio 0,18%; Contenido de humedad 53,20%. Cifras en rangos normales lo que indica que un sistema de control automatizado es totalmente compatible con un proceso biológico multivariable.

Este desarrollo de sistema automatizado (Figura 9) proporciona consistencia al contenido de humedad del suelo del vermicompost, los microcontroladores ayudan a una respuesta más rápida y con un menor esfuerzo físico para obtener los resultados

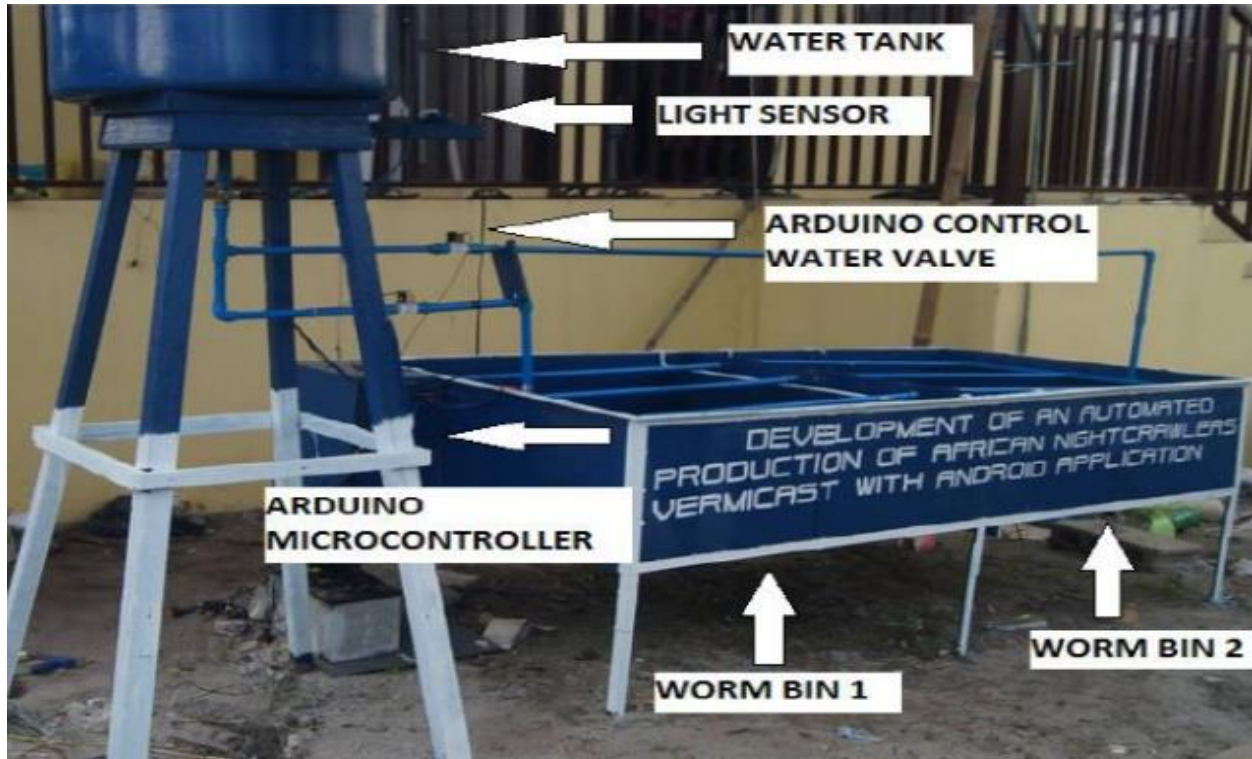


FIGURA 9: Prototipo funcional sistema automatizado.

CAPÍTULO 03
METODOLOGÍA

CAPÍTULO 03

METODOLOGÍA

En esta sección se muestra en detalle la metodología que se utilizó para llegar a la propuesta del sistema de monitoreo y evaluación.

En base a los antecedentes y las tecnologías desarrolladas, se puede identificar una tendencia en cuanto a mecanismos y dispositivos a utilizar. El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de monitoreo automatizado de vermicompost, esta característica permitirá obtener un resultado más estandarizado, disminuir el contacto humano con el biorreactor y acelerar la respuesta en situaciones adversas dentro de este.

Para cumplir con el objetivo anterior se establecen 4 etapas, la primera consiste en la definición de la problemática y el contexto; en la segunda etapa se establecen los componentes que tendrá la estructura del sistema de monitoreo, esto con la ayuda del modelo Hubka y el estudio de referentes; la tercera etapa consiste en el planteamiento

del sistema de evaluación de las variables temperatura y humedad.; por último, la cuarta etapa consiste en el desarrollo del algoritmo de funcionamiento apoyado, gráficamente, por la modelación 3D.

3.1 Primera etapa: Problemática y contexto de estudio

En esta sección se define el problema de manera general en base a su contexto de estudio. El contexto se establece como un caso de estudio determinado, para identificar una oportunidad de desarrollo factible.

El levantamiento de información permite dimensionar la escalabilidad de la propuesta, pudiendo establecer el nivel de tecnología más adecuado. Para este caso, será la comuna de Puente Alto; la estimación de cantidades de desechos en rangos de tiempo determinados permite, de manera preliminar, establecer los puntos de partida en materia de diseño.

3.2 Segunda etapa: Diseño de estructura y componentes del sistema de monitoreo

En esta etapa se establece la configuración del sistema de monitoreo, sus componentes y funciones. Al existir varios procesos de vermicompostaje, además de mecanismos de monitoreo (controladores y sensores), es fundamental aplicar una metodología que permita comparar distintas propuestas y así elegir la más adecuada.

A través del modelo Hubka, se espera determinar la forma y la configuración final de los componentes del biorreactor. Este modelo genera una conexión entre el diseño conceptual y un contexto real, permitiendo una asimilación visual por parte del diseñador, identificando las posibles ventajas entre diferentes configuraciones (Rodríguez, 2015).

Partiendo desde el diseño conceptual, se definen parámetros que debe cumplir el diseño y el funcionamiento del biorreactor; estas características se definen de manera imparcial, para así no condicionar una

propuesta por sobre otra. A cada parámetro se le asigna una ponderación del total de parámetros (peso individual), luego se establece una escala con la cual se evaluará cada uno de los parámetros inicialmente definidos, una vez terminado el análisis de asignación de puntajes se suma el total ponderado de cada criterio, el que tenga la cifra mayor representará la combinación más integral.

Como resultado de esta etapa el ingeniero debe escoger la mejor configuración para el desarrollo del producto, además de tener en conocimiento las configuraciones que vienen a continuación, en caso de que la escogida no se pueda realizar. Al terminar esta etapa se tendrá información completa de las ventajas y desventajas de cada una de las configuraciones propuestas (Urrutia V, 2017)

3.3 Tercera etapa: Estructura de procesamiento de datos

El objetivo de esta sección es desarrollar un sistema que permita procesar y evaluar los registros obtenidos por los instrumentos de medición. El sistema de monitoreo estará en función del desplazamiento de las lombrices dentro del biorreactor; la distribución y los movimientos normales que realizan las lombrices dentro de un bioreactor están documentados, existen zonas críticas en las cuales las lombrices se sitúan cuando las condiciones son favorables o desfavorables, la lectura de la temperatura y la humedad en zonas estratégicas permitirá determinar el comportamiento y las condiciones en las que se encuentran las lombrices sin la necesidad de ver el interior del bioreactor.

Con la ayuda de fórmulas de análisis de datos aplicados a este contexto se llegará a obtener información más precisa en cuanto a distribución y desplazamiento de las lombrices; ambos fenómenos relacionados a

las variables temperatura, humedad, aireación y calidad de la materia orgánica ingresada al bioreactor.

3.4 Cuarta etapa Modelación 3D y algoritmo de funcionamiento.

Una vez definidos los componentes, la estructura y la forma es que se moverá el sistema de monitoreo del biorreactor, el siguiente paso es definir los pasos secuenciales que ejecutará el sistema de monitoreo, es decir, qué componentes actúan en determinado momento y qué sucede con los datos que van midiendo los sensores y calculando el microcontrolador. La modelación 3D del sistema de monitoreo complementará esta sección de manera gráfica en cada etapa del algoritmo, especificando zonas y componentes.

CAPÍTULO 04
PROPUESTA

CAPÍTULO 04

PROPUESTA

A continuación se presenta el desarrollo de cada una de las etapas descritas en el capítulo anterior, desde la instancia en que se identifica la oportunidad de desarrollo, hasta su representación virtual.

Al ser una propuesta conceptual se expondrán las justificaciones y los métodos de decisión utilizados, minimizando las incertezas ante una posible implementación.

4.1 Problemática

La situación que el mundo vive en materia medioambiental está llegando a una etapa crítica. Basado en la evidencia, cerca del 97% de los científicos que estudian clima están de acuerdo en que el cambio climático causado por el ser humano está sucediendo. (American Association for the Advancement of Science, 2013); cada país avanza a un ritmo diferente en cuanto a sus medidas para contrarrestar este avance.

En el caso de Chile, hay una fuerte iniciativa en materia de energía solar y eólica, hoy casi

el 25% de la electricidad del país es suministrada por fuentes renovables no convencionales. El futuro energético es verde y para 2040 toda la energía que Chile necesita podría provenir de energías limpias (La Tercera, 2021).

Si bien el uso de fuentes de energía no convencionales son un gran aporte para la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI), existen áreas en donde el desarrollo es mínimo, como por ejemplo, la recuperación de suelos agrícolas y el tratamiento de residuos. En la mayoría de los rellenos sanitarios antiguos se presentan fugas de CH₄ (Metano) y CO₂ (Dióxido de Carbono), ya que no están diseñados con recolectores de biogás (Gases de invernadero generados de residuos sólidos, 2001), generando una gran cantidad de emisión de GEI.

Chile es uno de los países que más basura produce por habitante (1,26 kg/día promedio) en Sudamérica y la cantidad total

de desechos que se reutiliza es solo del 1%, estas cifras dan cuenta del poco incentivo a concretar proyectos que vayan en esta dirección.

El actual gobierno propuso un plan de tratamiento de residuos para el largo plazo, este apunta a que en los próximos 30 años se logre una revalorización del 70% de los residuos que se generan. Será muy difícil alcanzar esta meta sin la ayuda de nuevas tecnologías y procesos; estamos en la etapa más crítica que es el punto en donde se genera el cambio hacia un sistema de tratamiento y revalorización de residuos, hay que tener en cuenta que no existe en la sociedad una cultura masiva de reciclaje, por lo que el proceso de orientación hacia nuevos mecanismos de tratamiento de residuos parte desde las instituciones públicas y/o privadas (recolección e implementación de plantas de tratamiento de residuos) para finalizar en las personas,

creando un ciclo colaborativo de revalorización.

La oportunidad de desarrollo se genera producto de *la falta de conocimientos y la escasa práctica en materia de tratamiento de residuos en Chile, provocando que la transición hacia el aprovechamiento de estos sea lenta*. Lo anterior da espacio a *desarrollar elementos que faciliten la operación y el control de estos procesos*.

4.2 Contexto de estudio

Frente a la problemática descrita y la oportunidad de desarrollo en elementos facilitadores de operación y control de residuos, es importante tener una estimación cuantitativa ante un posible escenario de implementación, es decir, cantidad estimada de residuos a procesar, lo que determinará un cálculo estimado de capacidad de planta, cifra importante ante un análisis de prefactibilidad.

El proceso de tratamiento que se utilizará es el Vermicompostaje, por su rapidez en materia de degradación y por su eficiencia en la recuperación de nutrientes para suelos agrícolas.

Debido a que los residuos se recolectan por comunas, el estudio de contexto también se guiará por el mismo sistema. La comuna que cuenta con el mayor número de habitantes es Puente Alto con 570.000 personas (CENSO, 2017). Si extraemos el dato del promedio nacional diario de residuos (1,2 kg/persona) la cantidad de residuos diarios en la comuna es de 640 toneladas, pero por lo general solo un 60% corresponde a desechos orgánico, lo que deja una cantidad de 384 toneladas diarias.

Las lombrices del tipo Eisenia Fetida tienen la capacidad de ingerir y descomponer una cantidad de desechos equivalente a la mitad de su peso en un lapso de 1 día. Esta especie puede alcanzar un peso máximo de 889 ± 90 mg por lombriz (Ali S, Kashem MA;

2018), de manera que una lombriz puede degradar 0.5 gr/día.

Un biorreactor en condiciones normales parte con una densidad promedio de 4 kg/m² (tener en consideración que las lombrices se sitúan entre 0-20 cm de profundidad desde la superficie); la densidad tiende a duplicarse cada 60 – 90 días y un proceso completo de degradación dura 3-4 meses, por lo que para efectos de cálculo, en una etapa normal de operación, se considera una densidad de 8 kg/m². Con estas consideraciones el cálculo de degradación por m² es de 4 kg/día, es decir, para procesar todo los desechos diarios se necesitan como mínimo 32 hectáreas, ajustando la cifra al objetivo 2050, la cifra queda en 23 hectáreas para la planta de tratamiento para la comuna de Puente Alto. La comuna de Puente Alto posee una superficie total de 8.800 hectáreas, por lo que 23 hectáreas corresponden al 0.26%; cifra totalmente alcanzable sabiendo que en la región

metropolitana 400 hectáreas son usadas como vertederos ilegales (La Tercera, 2017)

4.3 Diseño de componentes

El proceso que brinda la mayor calidad de sustrato es el vermicompostaje, este proceso demora una menor cantidad de tiempo en completarse al compararlo con el compostaje tradicional; tiene la capacidad de adaptarse al nivel de desechos requeridos (modular); el nivel de tecnología es menos compleja que otros procesos como, por ejemplo, digestión anaeróbica, la contraparte es la necesidad de mantener rangos óptimos en determinadas variables dentro del biorreactor. Este nivel de control a pequeña escala lo puede realizar una persona o un grupo de personas, ya que el biorreactor es pequeño y/o el número de biorreactores es reducido, pero a una escala mayor la participación humana en un proceso de medición como este se dificulta debido al acceso a puntos estratégicos de medición dentro del biorreactor, extensa

exposición a un ambiente con alta concentración de microorganismos y una mayor probabilidad de error al monitorear una gran cantidad de datos. Debido a estas consideraciones se hace necesario recurrir a elementos como la automatización, tanto para el sistema de incorporación de los desechos orgánicos al biorreactor como para el sistema de monitoreo de las variables a controlar. En este trabajo se aborda el sistema de monitoreo de variables en un biorreactor de flujo continuo.

El biorreactor de flujo continuo fue desarrollado por el Dr. Clive Edwards durante los años 80, el sistema consiste en una estructura rectangular separada del suelo. La denominación “flujo continuo” se refiere a que las lombrices nunca ven alterado su ambiente, debido a que el material es añadido por la parte superior y retirado por la rejilla inferior (Figura 10), por lo que las lombrices siempre quedan en la zona intermedia. Hoy en día este tipo de

biorreactor es uno de los más eficientes y ha sido replicado y mejorado por numerosas empresas dedicadas a esta actividad.



FIGURA 10: Interior de un biorreactor de flujo continuo.

Para poder llevar un control de las variables más importantes del proceso de vermicompostaje a gran escala, es necesario hacer uso de recursos tecnológicos. Estudios recientes, como los descritos en el punto 2.5 del capítulo 02, muestran los primeros pasos de automatización a una escala reducida, en este trabajo se desarrolla una propuesta pensando en una escala mayor a través del

monitoreo y control, con el fin de sacar el mayor rendimiento al biorreactor.

Tomando como referentes a los trabajos desarrollados por la Universidad de Volgogrado y la Universidad Don Honorio Ventura En una primera instancia se definirán los componentes que estarán conectados a una unidad de control (UC), esta unidad de control puede ser, por ejemplo, una placa de Arduino Uno. Los componentes conectados a la UC cumplirán la función de medir las variables de temperatura y humedad. Los componentes esenciales son:

- 1.- Sensor de temperatura y Humedad .
- 2.- Sensor de humedad relativa.
- 3.- Sensor(es) de distancia.

Estos 3 elementos son el pilar de la herramienta que ejecuta las mediciones de temperatura y humedad. Como referencia se muestran algunos sensores disponibles en el mercado que pueden cumplir con esta

tarea, a continuación se describen y analizan sus ventajas.

Sensor de temperatura

Las principales especificaciones para tomar en cuenta al momento de elegir un sensor de temperatura para este proyecto son, rango de temperatura; sensor análogo o digital; precisión y tiempo de respuesta. Un ejemplo de sensor de temperatura que se adapta a las características del proyecto es el sensor de temperatura analógico LM35 (Figura 11), con un rango de temperaturas entre -55°C a 150°C , precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ y tiempo de respuesta (100%) de 4 min.

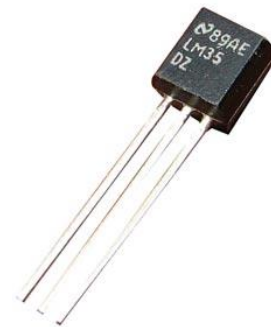


FIGURA 11: Sensor de temperatura LM-35.

Sensor de humedad

En el caso del sensor de humedad, las principales especificaciones para tomar en cuenta son, salida analógica y voltaje entrada y salida. El sensor de humedad YL-69 (Figura 12) cuenta con salida analógica y digital y un voltaje de entrada de 3.3 – 5 VCD y un voltaje de salida de 0 – 4.2 V. El sensor conectado en análogo entrega un valor entre 0 – 1023, siendo cero el valor de máxima humedad (100%) y 1023 el de mínima (0%). Para este caso, el microcontrolador utilizado debe tomar este valor y transformarlo a una escala porcentual.

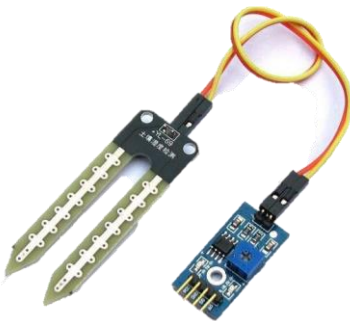


FIGURA 12: Sensor de humedad YL-69.

Sensor de distancia

Para el sensor de distancia se debe tener en consideración la tecnología que usa el dispositivo, el rango de medición y el voltaje. El sensor PING))) de distancia (Figura 13) es un sensor ultrasónica, su rango va desde 0.02 – 3 metros y su voltaje de operación es 5V.



FIGURA 13: Sensor ultrasónico PING))).

A continuación se debe definir como esta unidad de control interactúa en conjunto con el biorreactor, para esta etapa se utilizará el modelo Hubka, estableciendo parámetros en base a algunas propuestas de funcionamiento.

4.4 Modelo Hubka

Para aplicar el modelo Hubka primero se proponen distintos mecanismos de funcionamiento y disposición para un biorreactor de vermicompostaje, para así poder evaluar y comparar parámetros de decisión. En base al desplazamiento ascendente que desarrollan las lombrices y el hecho que el biorreactor es llenado con materia orgánica de manera periódica, la herramienta de monitoreo debe, necesariamente, desplazarse de manera controlada a través de un eje vertical; además debido a que la temperatura no es uniforme dentro del biorreactor, las lombrices se moverán por la gradiente de temperatura buscando el rango óptimo de (15°C – 30°C). La gradiente de temperatura en el compostaje y vermicompostaje tiene su origen debido a la calidad de aireación y a la heterogeneidad del material orgánico que se está incorporando (Barrera, N. 2006).

Tomando las consideraciones en base a los fenómenos previamente descritos, las propuestas deben tener como primera condición que la herramienta de medición de temperatura y humedad pueda moverse en los tres ejes de coordenadas y de manera controlada.

También es sabido que por transferencia de calor, la temperatura en los extremos, cercano a los bordes del biorreactor, debería ser menor a la temperatura en el centro de este, por lo que se pueden establecer zonas predeterminadas en las que la lectura de las variables será más significativa. Las zonas (Figura14) propuestas para las lecturas son las siguientes.

Zona A: zona del centro del biorreactor. En condiciones normales debería entregar el mayor valor en la medición de la temperatura, este valor se debe contrastar con las otras dos zonas para determinar la aireación y la calidad del material orgánico añadido.

Zona B: zona intermedia entre el centro y el extremo del bioreactor. En condiciones normales debería ser menor al valor del centro y mayor a la zona del extremo. Esta medición será el primer indicador de un posible aumento no deseado de la temperatura.

Zona C: zona en los extremos del biorreactor. Una temperatura en los extremos dentro del rango óptimo es un indicador de una buena aireación, por el contrario una alta temperatura en los extremos podría indicar problemas de la calidad de la materia orgánica o plagas; esta zona es de gran relevancia.



FIGURA 14: Vista de planta del biorreactor indicando las zonas A,B y C.

Las propuestas están diseñadas en base a referentes de máquinas con movimientos en tres dimensiones, como por ejemplo, máquinas de mecanizado CNC. Todas las propuestas están diseñadas para operar desde la parte superior del biorreactor, además de contar con un actuador telescópico para ajustarse a la distancia vertical requerida de cada medición.

Se presentan 3 propuestas, descritas a continuación.

4.4.1 Propuesta 1

Sistema de monitoreo con desplazamiento en el plano horizontal superior del biorreactor. La herramienta única de medición tiene desplazamiento en un plano vertical, se ajusta a la distancia de la superficie donde se encuentra el material orgánico para hacer la medición a la altura correspondiente (Figura 15).

4.4.2 Propuesta 2

Sistema de monitoreo con desplazamiento a lo largo del biorreactor, compuesto por una plataforma que contiene tres herramientas de medición de temperatura y humedad, las herramientas pueden desplazarse solo en dirección vertical a través de un actuador telescópico (Figura 16).

4.4.3 Propuesta 3

Sistema de monitoreo pivoteado con movimiento a lo largo del contenedor, cuenta con un sistema rotacional en 180°; además, la herramienta posee desplazamiento a lo largo de un riel. La herramienta de medición también opera a través de un actuador telescópico para ajustarse a la distancia del material orgánico a analizar (Figura 17).

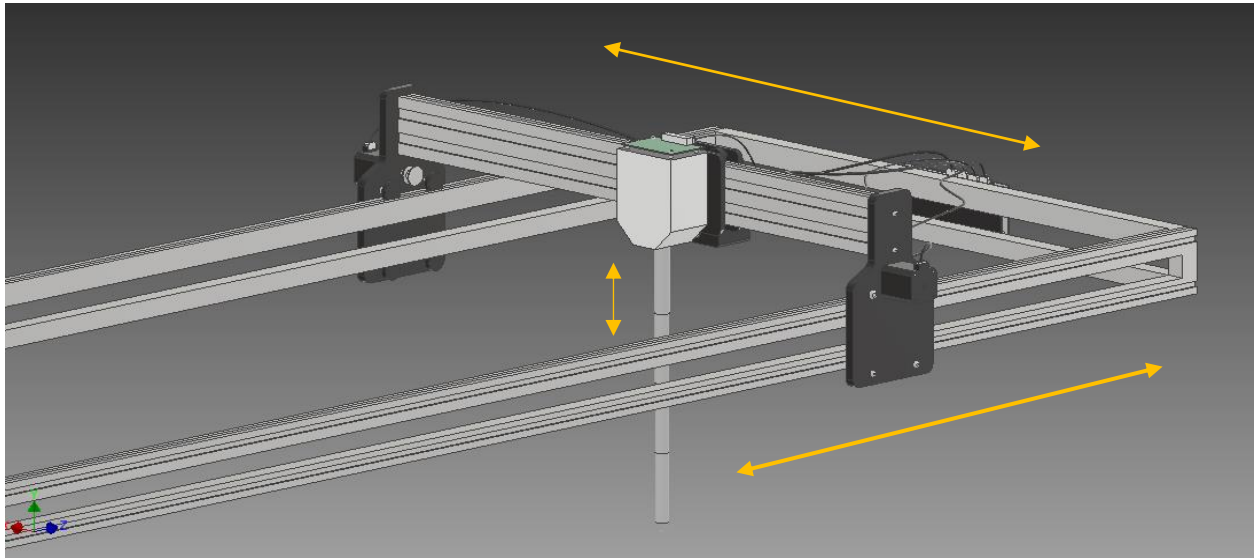


FIGURA 15: Propuesta 1.

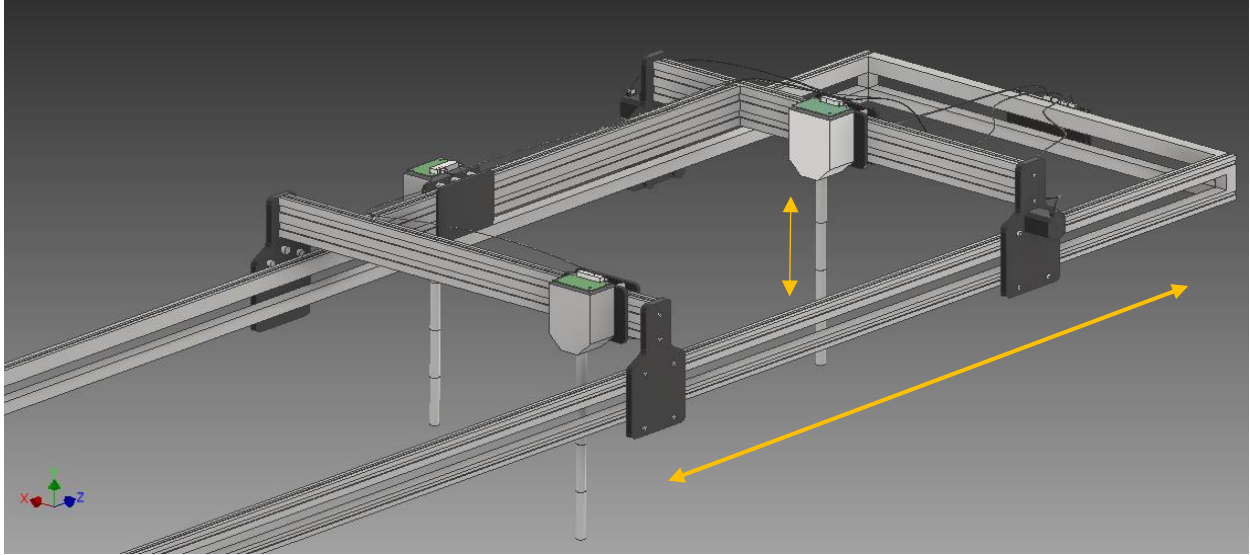


FIGURA 16: Propuesta 2.

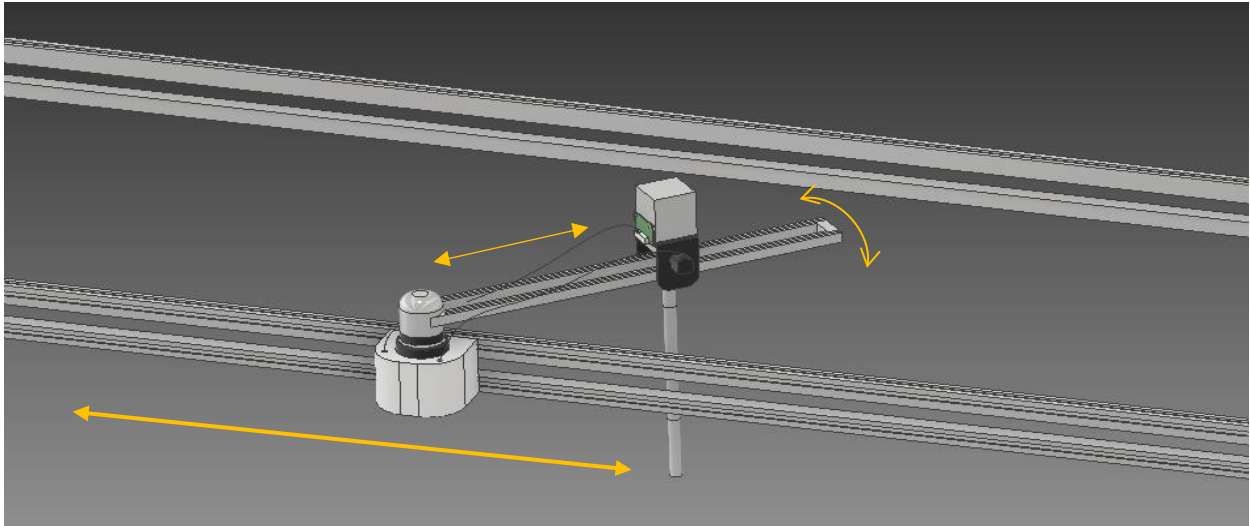


FIGURA 17: Propuesta 3.

4.4.4 Hubka

La elección de una de las propuestas antes descritas se basará en una combinación de aspectos necesarios de funcionamiento, estos aspectos serán evaluados de forma individual para cada propuesta, de manera que la propuesta con mayor evaluación será elegida como la más adecuada.

Los aspectos elegidos para evaluar las propuestas fueron los siguientes:

Precisión: se evalúa la capacidad de desplazamiento de la herramienta a través de los ejes en los que puede operar. Mientras mayor libertad de movimiento a través de los ejes, mayor es la disponibilidad de zonas a analizar, teniendo una mayor cantidad de datos en zonas críticas, la medición será más confiable. Se le proporciona un 25% del total de la evaluación.

Rapidez: se evalúa el tiempo que demora una unidad en realizar una medición o una

serie de mediciones dependiendo del diseño. El tiempo de medición y evaluación es una variable mucho más relevante que la precisión debido a que se requiere de una evaluación en un tiempo que no perjudique otras operaciones del proceso. Se le proporciona un 35% del total de la evaluación.

Complejidad: se evalúa la cantidad de componentes y la cantidad de movimientos que debe efectuar la estructura junto con la herramienta para obtener las mediciones. A mayor valor de complejidad, menor cantidad de componentes tiene la propuesta. Se le proporciona un 20% del total de la evaluación.

Tamaño: se evalúa el espacio que ocupa la estructura junto con la(s) herramienta(s) de medición, con el fin de optimizar el gasto en de fabricación, mantención, transporte, entre otros. El valor más alto 10 corresponderá a un menor tamaño o volumen ocupado por la estructura junto con la herramienta de

medición. Se le proporciona un 10% del total de la evaluación.

Interacción con otros componentes y/o procesos (IOCP): se evalúa si hay interferencia con el funcionamiento de otros elementos del biorreactor u otros procesos que ocupen la misma zona de operación. Un valor de 10 representa nula interferencia con otros elementos de biorreactor. Se le proporciona un 10% del total de la evaluación.

El sistema de evaluación será asignando a cada criterio un número del 1 al 10, en donde 1 representa que el criterio no se cumple y 10 en donde el criterio se cumple totalmente.

El modelo Hubka definirá si un aumento en el número de herramientas perjudicará a los otros requerimientos necesarios de la propuesta, llegando al punto de perder valor de manera integral.

Propuesta		1	2	3
Criterio	%			
Precisión	25	9	7	7
Rapidez	35	3	9	3
Complejidad	20	8	3	8
Tamaño	10	6	2	9
IOCP	10	6	8	7
TOTAL		6.1	6.5	6.0

Tabla 1: Desarrollo modelo Hubka.

El método Hubka nos indica que la propuesta 2 es la que cumple con la mayoría de los criterios de manera satisfactoria. Al comparar cada uno de los criterios, queda en evidencia que la propuesta 2 no es la más precisa debido a que no posee la misma libertad de movimiento que los otras propuestas, pero la propuesta 2 sitúa las herramientas de medición en puntos estratégicos, convirtiéndola en la propuesta más simple en materia de desplazamiento y a la vez la más rápida debido a que solo debe desplazarse a lo largo del biorreactor, además de un mayor número de sensores.

Si bien la propuesta 2 posee tres herramientas de medición, a diferencia de las otras propuestas que cuentan con solo una, la comparación es realizable debido a que la propuesta 2 adquiere más herramientas de medición a cambio de mayor complejidad, menor precisión y mayor tamaño.

Por otra parte, la propuesta 3, sacrifica precisión por complejidad y tamaño, pero en base a las ponderaciones no significa un cambio que permita evaluarla por sobre un nivel de rapidez superior.

El modelo Hubka apoya la decisión de complejizar el sistema en favor de una mayor velocidad de operación.

4.5 Sistema de evaluación y análisis de datos

La propuesta 2 toma mediciones en 3 zonas estratégicas de la materia orgánica dentro del biorreactor, denominadas con las letras A, B y C como indica la Figura 14.

Debido a factores como la transferencia de calor, el nivel de aireación del material orgánico y la calidad de los residuos, existirán diferentes temperaturas y humedades dentro del biorreactor. Para determinar si las lombrices están actuando en rangos óptimos de temperatura y humedad habrá que procesar estas mediciones a través de comparativas y fórmulas que permitan detectar comportamientos no deseados.

Con la ayuda del principio de transferencia de calor se sabe, a priori, que en condiciones normales la temperatura más alta, dentro del biorreactor, estará en el centro. La gradiente de temperatura en la superficie del biorreactor es representada a través de la figura x

En esta primera instancia de estudio se define la situación ideal; las condiciones que se buscan alcanzar para el correcto funcionamiento del biorreactor. Las dos primeras condiciones ideales son cálculos

representativos de temperatura y humedad dentro de los rangos óptimos (Temperatura entre 15°C – 30°C; Humedad relativa entre 70%-80%), la tercera condición es una distribución de temperaturas como lo muestra la Figura 18, es decir, una gradiente de temperatura con un máximo en centro y un mínimo en los extremos. Estas condiciones indicarán que las lombrices están trabajando en condiciones favorables; además de estar situadas, en su mayoría, en la zona B de la superficie, esto nos indica que hay un flujo por toda la superficie, degradando toda la materia orgánica a lo largo y ancho del biorreactor. Al existir un flujo distribuido por toda la superficie, nos indica que la aireación es óptima y que no existen plagas que estén reduciendo la población de lombrices.

Se definirán 3 etapas para el diagnóstico del comportamiento dentro del biorreactor. La primera etapa será de reconocimiento, es decir, que las mediciones de temperatura y

humedad estén, manera individual, dentro de los rangos. La segunda etapa es el cálculo de Humedad relativa y temperatura en distintas secciones del biorreactor. Y, por último, una tercera etapa que corresponde al cálculo de la desviación estándar de los valores medidos. Con este procedimiento se espera hacer un diagnóstico general pero además identificar zonas críticas dentro del biorreactor que puedan, a futuro, provocar problemas.

La propuesta elegida cuenta con una estructura móvil a lo largo del biorreactor, y con tres herramientas de medición que funcionan de manera independiente. La estructura móvil, al detenerse en un sector realiza tres mediciones de temperatura y tres mediciones de humedad relativa, en las zonas A, B y C como muestra la figura 18.

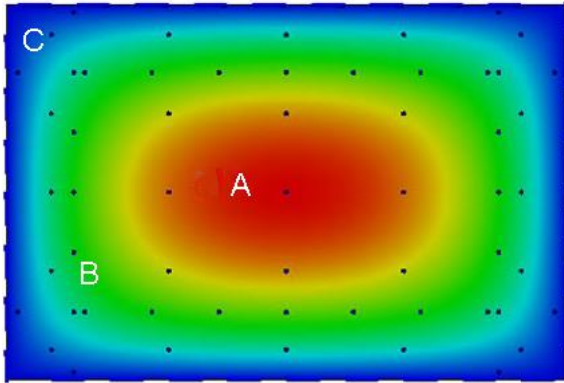


FIGURA 18: Gradiente de temperatura ideal en un biorreactor de Vermicompostaje de flujo continuo.

Estos datos de temperatura y humedad relativa son almacenados por una unidad de almacenamiento incorporada al microcontrolador de cada herramienta, para luego ser procesados, identificando si los rangos óptimos se están cumpliendo (1). Esta primera etapa se define de la siguiente manera.

H_A: herramienta de la zona A.

T_A: temperatura de H_A

W_A: humedad de H_A

H_B: herramienta de la zona B.

T_B: temperatura de H_B

W_B: humedad de H_B

H_C: herramienta de la zona C.

T_C: temperatura de H_C.

W_C: humedad de H_C.

$$15 \leq T_{Ai}, T_{Bi}, T_{ci} \leq 30 \quad (1)$$

$$70 \leq w_{Ai}w_{Bi}w_{ci} \leq 80$$

El microcontrolador principal tendrá acceso a los datos de los microcontroladores secundarios. El microcontrolador principal guardará la información de las zonas que estén fuera de rango, es decir, el número de la medición y la zona a la que correspondan sea A, B, o C. De esta forma, el reconocimiento de problemas de operación dentro del biorreactor se simplifica.

El microcontrolador principal calculará un promedio ponderado de temperatura y humedad relativa, esto debido a que dentro de las zonas A, B y C existen zonas más y menos deseables de ubicación de las lombrices. La situación ideal es que las lombrices se concentren en la zona B, por lo que esta zona deberá tener una ponderación mayor que las zonas A y C. La siguiente tabla muestra los pesos asignados a las zonas A, B y C.

Zona	Peso
A	2
B	3
C	1

Tabla 2: Asignación de ponderaciones a cada zona.

A la zona B se le asigna el mayor valor que corresponde a 3, una proporción 3:1 entre B y C distribuye los pesos de una manera más proporcionada, colocando a la zona A en una posición intermedia con el valor 2.

Para calcular la temperatura y la humedad de una sección del biorreactor se procederá a utilizar la siguiente fórmula:

Temperatura ponderada

$$T_{Pi} = \frac{2T_{Ai} + 3T_{Bi} + T_{Ci}}{8} \quad (2)$$

Donde;

T_{Pi} : Temperatura ponderada de la sección i.

T_{Ai} : Temperatura de la zona A en la sección i.

T_{Bi} : Temperatura de la zona B en la sección i.

T_{Ci} : Temperatura de la zona C en la sección i.

Humedad relativa ponderada

$$W_{Pi} = \frac{2W_{Ai} + 3W_{Bi} + W_C}{6} \quad (3)$$

Donde;

W_{Pi} : Humedad relativa ponderada de la sección i.

W_{Ai} : Humedad relativa de la zona A en la sección i.

W_{Bi} : Humedad relativa de la zona B en la sección i.

W_C : Humedad relativa de la zona C en la sección i.

Estos valores de temperatura y humedad permiten diagnosticar de mejor manera el proceso en base a la condición ideal de funcionamiento. Las lecturas de T_{Pi} y W_{Pi} serán almacenadas por el microcontrolador

principal para nuevamente ser evaluadas de manera individual, es decir.

$$15 \leq T_{pi} \leq 30 \quad (4)$$

$$15 \leq w_{Pi} \leq 30$$

Por último, al finalizar el proceso de medición a lo largo del biorreactor, cada controlador secundario realiza un cálculo de desviación estándar por zonas (A, B, C) para identificar posibles secciones que estén realizando un comportamiento fuera de lo normal. La fórmula queda expresada como:

Desviación estándar temperatura de una zona (A, B, C) = DE_{zona}

$$DE_{zona} = \sqrt{\frac{\sum |T_i - \bar{T}|^2}{n-1}} \quad (5)$$

Donde:

T_i : es una medición individual de una zona del biorreactor;

\bar{T} : media aritmética de todas las mediciones de esa zona;

n : número de datos;

El cálculo para la humedad relativa se obtiene de manera semejante.

Para determinar si la desviación estándar calculada es alta o baja, se utilizarán los valores del rango óptimo de operación, para el caso de la temperatura se calculará una desviación estándar con los valores extremos del rango, 15°C y 30 °C.

$$DE_{\text{máxima T}} = \sqrt{\left(\frac{|15-22,5|^2 + |30-22,5|^2}{2}\right)} = 7,5$$

(6)

De esta forma un desviación estándar de temperatura, en cualquier zona A, B, C,

mayor a 7,5 representará un indicador de posible falla del proceso

En el caso de la humedad relativa, el cálculo de desviación estándar máxima queda de la forma.

$$DE_{\text{máxima W}} = \sqrt{\left(\frac{|70-75|^2 + |80-75|^2}{2}\right)} = 5,0$$

(7)

Estos datos son almacenados en el microcontrolador principal para ser contrastados entre las demás zonas, en caso de existir desviaciones estándar superiores al máximo de manera constante es necesario revisar condiciones de aireación, pH, homogeneidad de residuos, nivel de microorganismos, relacion C:H, entre otros.

4.6 Modelación 3D y algoritmo de funcionamiento.

En esta sección se presenta un esquema de funcionamiento de manera gráfica con la ayuda de la modelación 3D. Los pasos secuenciales que se ejecutarán y los componentes involucrados en cada etapa de operación.

Las figuras 19 y 20 muestran los elementos que componen la estructura de monitoreo y la herramienta de medición respectivamente. El microcontrolador principal estará conectado y en comunicación a través de cables, y de manera serial con los microcontroladores secundarios.

Estructura de monitoreo

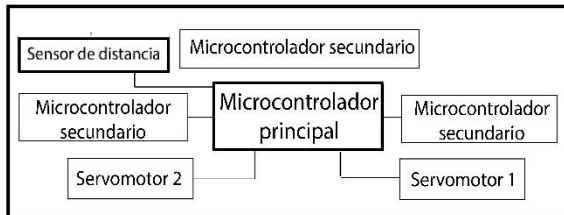


FIGURA 19: Marco de referencia estructura de monitoreo.

Herramienta de medición

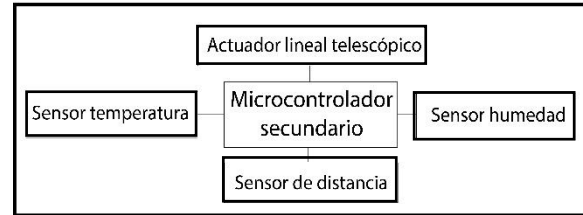


FIGURA 20: Marco de referencia herramienta de medición.

El esquema se divide en *estados*, cada estado representa un movimiento, acción de las herramientas de medición o una acción de un sensor.

Estado 0

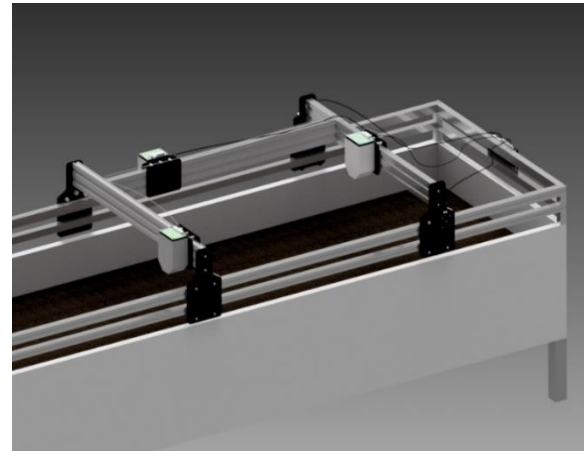


FIGURA 21: Sistema de monitoreo en Estado 0.

Representa un estado en reposo de la estructura de monitoreo (Figura 21), en este estado los sensores de distancia de cada herramienta miden la longitud vertical (Figura 22) que debe descender el actuador telescópico hacia la superficie del Biorreactor.

Una vez medido este valor, cada microcontrolador secundario suma la diferencia para cumplir con el rango donde las lombrices se encuentran activas.

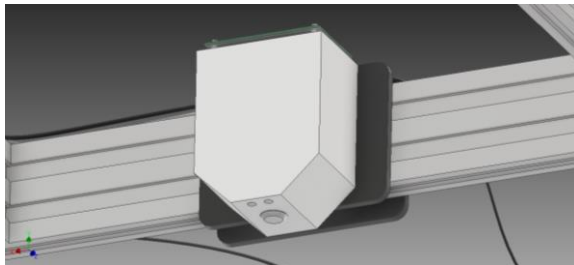


FIGURA 22: Sensor en estado 0 realizando una medición de distancia.

Según los antecedentes, la medición debe hacerse entre los 0 – 20 cm de profundidad desde la superficie, definiendo un valor

intermedio, el microcontrolador de cada herramienta realiza el siguiente cálculo:

$$D = D' \text{ (cm)} + 10 \quad (6)$$

Donde;

D = Distancia donde la herramienta realiza la medición.

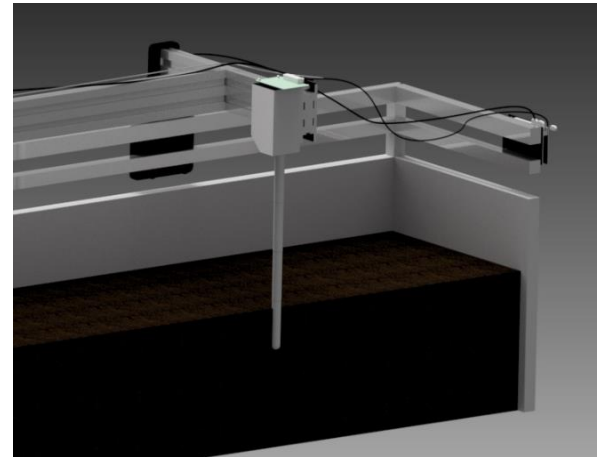


FIGURA 24: Herramienta midiendo datos de humedad y temperatura.

D' = Distancia desde el sensor a la superficie de desechos orgánicos.

El marco de referencia que representa la interacción de los elementos y el

procesamiento de los microcontroladores con las variables se muestra en la Figura 23.

Estado 1

Se procede a activar el actuador telescópico que contiene los sensores de temperatura y humedad, estos realizan la medición a la distancia antes mencionada (Figura 24).

Para fines posteriores, la medición de temperatura y humedad es almacenada en una unidad de almacenamiento de cada

microcontrolador secundario. Los microcontroladores secundarios evalúan los rangos óptimos con la Ecuación (1), en caso de que la medición no esté dentro del rango óptimo, el valor medido se guarda en el microcontrolador principal.

El marco de referencia que representa al estado 1 se aprecia en la Figura 25.

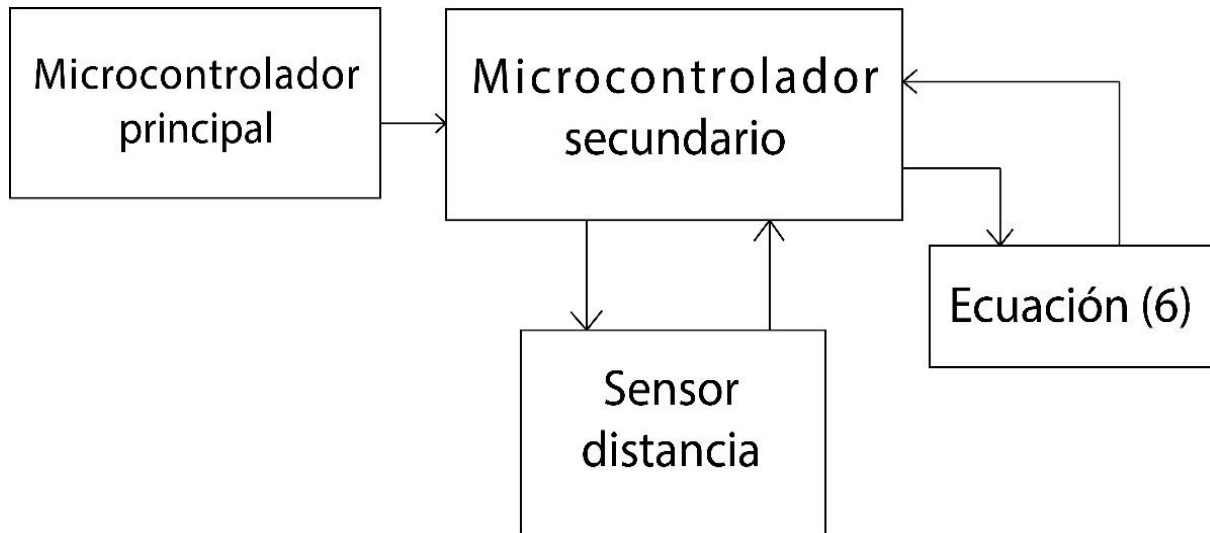


FIGURA 23: Marco de referencia del estado 0.

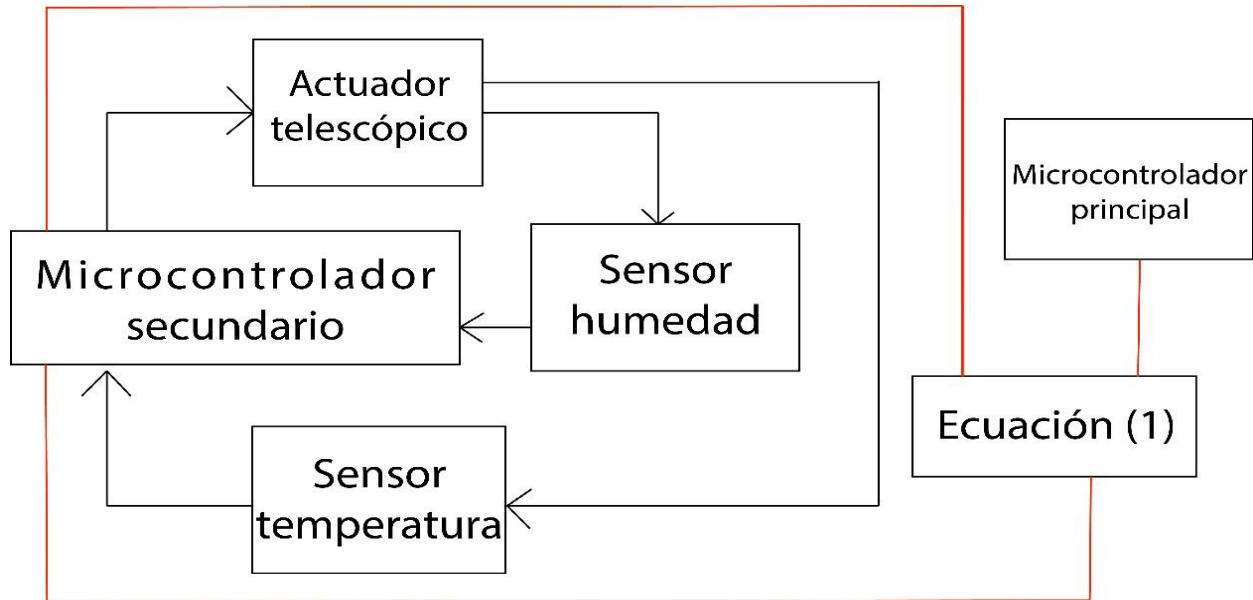


FIGURA 25: Marco de referencia del estado 1.

Estado 2

El microcontrolador principal accede a las lecturas individuales previamente medidas y almacenadas en las unidades de memoria de los microcontroladores secundarios. Posteriormente se aplica la Ecuación (2) para el caso de la temperatura y la Ecuación (3) para la humedad relativa. Los resultados obtenidos son evaluados por la Ecuación (4), en caso de no cumplir, a la variable se le

asignará el valor de 1 y será almacenada en el microcontrolador principal.

El marco de referencia de la Figura 26 representa las conexiones entre los elementos que operan en el estado 2.

Estado 3

Este estado corresponde a un movimiento de la estructura de medición. Luego de haber terminado con la medición y el cálculo de la temperatura y humedad ponderada, la estructura debe desplazarse a lo largo del biorreactor y colocarse en una nueva sección para realizar 3 nuevas lecturas en las zonas A, B y C; y repetir el proceso pasando por el estado 0, 1 y 2, respectivamente. Para el Estado 3, el microcontrolador principal utiliza un sensor de desplazamiento colocado en la estructura de medición como indica la figura 27.

Una vez medida la distancia desde el microcontrolador principal hasta la estructura de medición, el microcontrolador principal activa el movimiento de los servomotores para detenerse a otra distancia definida, se sugiere que la distancia sea igual al largo de la estructura móvil de medición. Una vez efectuado este

proceso la estructura estará situada en una nueva sección para realizar mediciones.

El marco de referencia de la Figura 28 representa las conexiones entre los elementos que operan en el estado 3.

Estado 4

El último estado del sistema de monitoreo corresponde al cálculo de la desviación estándar de cada zona. Al final del recorrido de la estructura móvil de medición, los microcontroladores secundarios efectuarán de manera paralela el cálculo de la Ecuación (5), tanto para la temperatura como para la humedad relativa, los mismos microcontroladores secundarios evaluarán los rangos óptimos para enviar esta información a la unidad de almacenamiento del microcontrolador principal.

El marco de referencia de la Figura 29 representa las conexiones entre los elementos que operan en el estado 4.

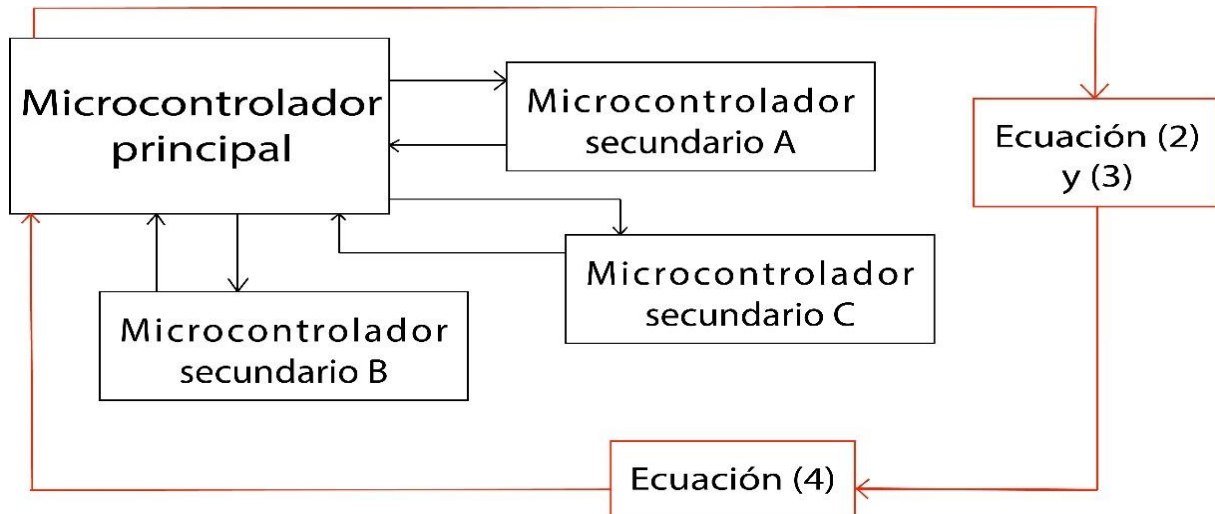


FIGURA 26: Marco de referencia del estado 2.

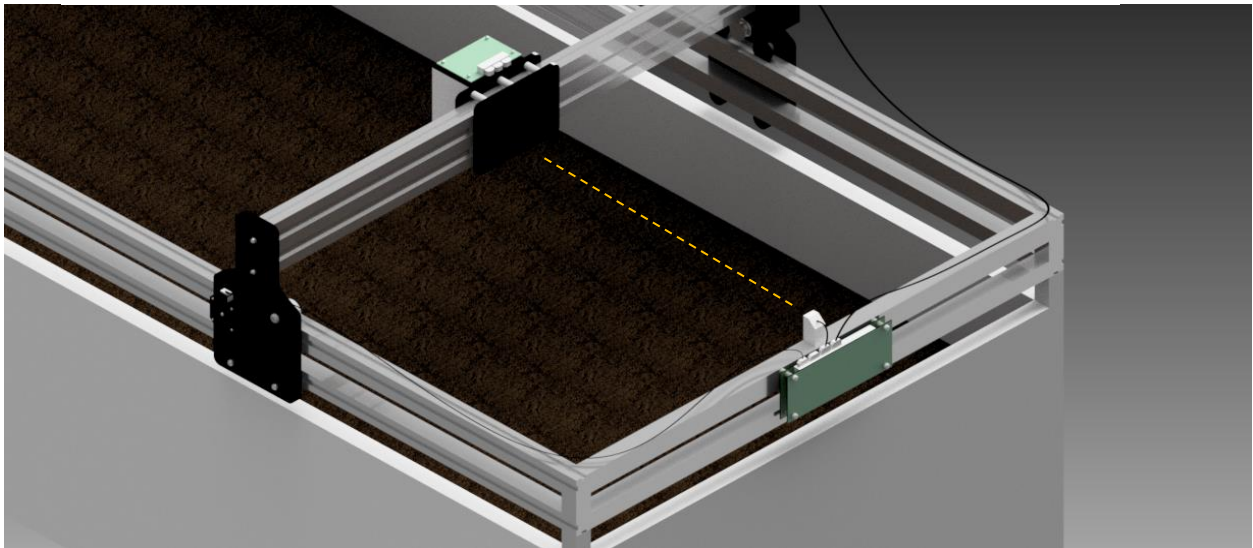


FIGURA 27: Sensor de desplazamiento midiendo distancia desde el microcontrolador principal hacia la estructura de medición.

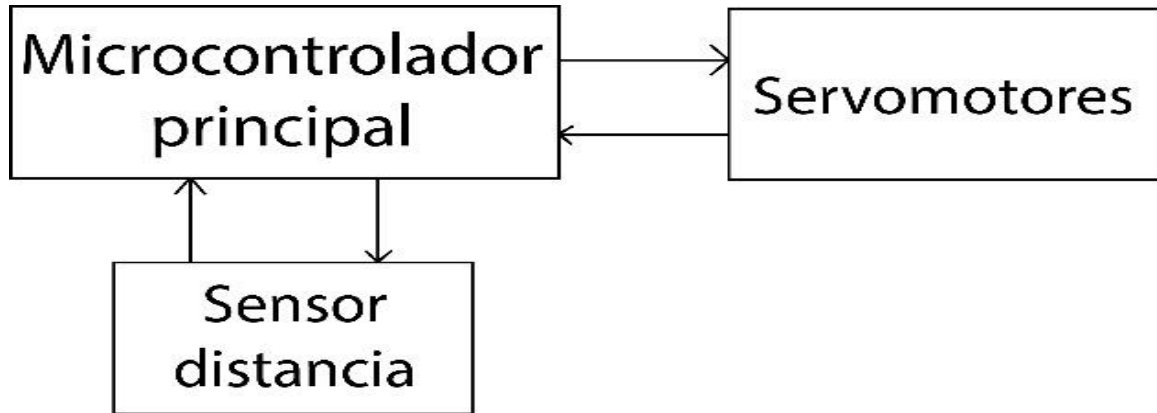


FIGURA 28: Marco de referencia del estado 3.

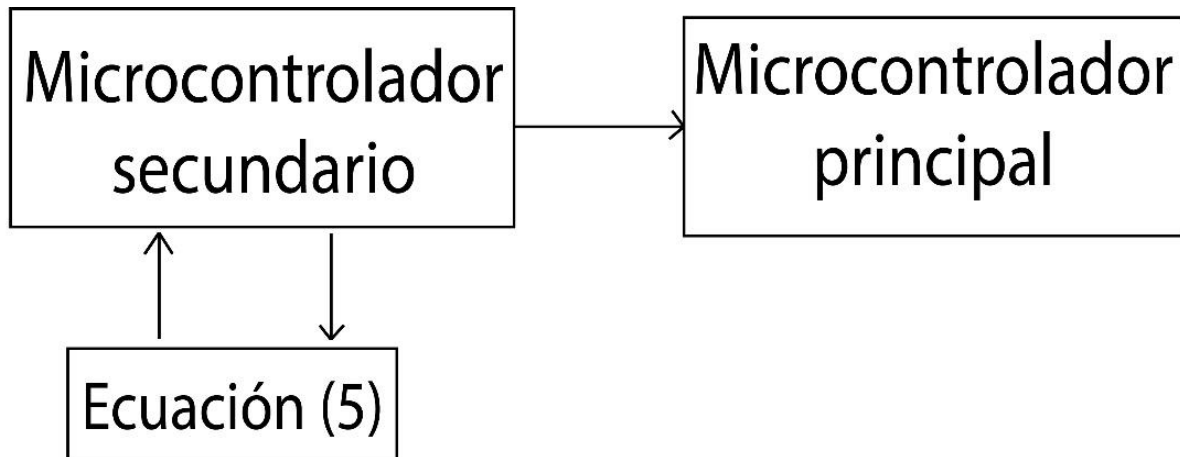


FIGURA 29: Marco de referencia del estado 4.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En base a los objetivos planteados, el desarrollo de la metodología logra crear un sistema de monitoreo y evaluación que, conceptualmente, recoge información de temperatura y humedad en zonas estratégicas del biorreactor. Se puede afirmar que los requerimientos más relevantes para el desarrollo de un proyecto de este tipo son la rapidez y la precisión en la obtención de las mediciones. Ambos requerimientos establecen una contradicción, ya que para tener mayor precisión se requiere una mayor cantidad de datos, lo que hace que el proceso demore más tiempo.

El modelo Hubka permitió ajustar estos dos requerimientos esenciales antes mencionados, para posteriormente evaluar si una mayor rapidez en la obtención de las mediciones impactaba de manera negativa en los demás requerimientos; los resultados mostraron que la suma ponderada evaluaba a la propuesta con mayor rapidez (propuesta

2) por sobre las demás propuestas que privilegiaban la precisión, el tamaño y la simpleza.

La propuesta 2, que incrementa la cantidad de herramientas, restringe el movimiento de estas con el fin de reducir su complejidad, pero al incorporar el concepto de zonas críticas A, B y C; la propuesta 2 maximiza su campo de acción, aprovechando la tendencia de las lombrices a buscar una zona intermedia dentro de un rango de temperatura y humedad.

En materia de adaptabilidad, las propuestas se ajustaron al diseño convencional de un biorreactor de flujo continuo. Si bien uno de los objetivos es generar una solución adaptable a los biorreactores más utilizados en el vermicompostaje, esto se dificulta debido al aumento de las variables a considerar; muchos biorreactores están pensados en base a la capacidad de procesamiento y al nivel de tecnología que poseen, haciendo muy complejo el

cumplimiento de este objetivo. Ante esto, se decidió adaptar las propuestas a un biorreactor que fuera en la línea de la automatización y fuese ampliamente aceptado en procesos industriales.

Referente al análisis de los datos medidos, el sistema desarrollado entregará información que permitirá evaluar si las condiciones adversas son una real amenaza al futuro comportamiento de las lombrices en el biorreactor. Zonas fuera de rango por periodos de tiempo muy extensos pueden dar cuenta de una mala calidad del material orgánico (alto contenido en grasas y/o poca homogeneidad en la incorporación al biorreactor), problemas de climatización, plagas, entre otros.

Este trabajo, al ser conceptual, requiere de un proceso de validación y desarrollo de componentes bastante extenso, tanto a nivel teórico como a nivel de mecanismos. En el plano teórico se debe validar, a través de un prototipo a escala, la distribución de la

población de lombrices en función de los rangos óptimos de temperatura y humedad. A nivel de mecanismos es fundamental el desarrollo del actuador telescópico en comunicación con los sensores de distancia, para así ejecutar las mediciones a la medida requerida; además de la configuración definitiva del microcontrolador principal con los microcontroladores secundarios y sus respectivos componentes.

En cuanto al manejo de los datos medidos, es de gran relevancia pulir los métodos aquí propuestos, además de generar nuevas herramientas de decisión que permitirán predecir un comportamiento futuro, con el fin de estandarizar el proceso del tratamiento de desechos orgánicos. Lo anterior es posible a través de mapas de temperatura y humedad en escalas de tiempo amplias, esto permitirá encontrar patrones de comportamiento y/o ciclos a lo largo de ciertos periodos de tiempo.

Por último, el tratamiento de desechos orgánicos en Chile a través de procesos industriales de vermicompostaje es una tarea completamente realizable. Los cálculos indican que la capacidad de planta de un proyecto de estas características no escapa de lo que ya se está utilizando para depositar los desechos orgánicos e inorgánicos de las principales ciudades. Las problemáticas referentes al cuidado del medioambiente son cada vez más abordadas por el Estado y la ciudadanía, creando un escenario muy favorable para el financiamiento, desarrollo e implementación de proyectos de innovación de tratamiento de desechos.

REFERENCIAS

AAAS Annual Report, 2013. Recuperado de https://www.aaas.org/sites/default/files/AAAS_2013-Annual-Report.pdf

Ali S, Kashem Ma. 2018. Life Cycle of Vermicomposting Earthworms *Eisenia Fetida* and *Eudrilus Eugeniae* under laboratory controlled condition. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, 2018, vol. 10, issue 5, 8110-8113

Appelhof, Mary. 2003. "Notable Bits". In WormEzine, Vol 2(5). May. Available at <http://www.wormwoman.com>

Arancon, Norman. 2004. "An Interview with Dr. Norman Arancon". In Casting Call, 9(2), August.

Atiyeh, R.M, S. Subler, C.A. Edwards, G. bachman, J.D. Metzger, and W. Shuster. 2000. "Effects of vermicompost and composts on plant growth in horticultural container media and soil". In *Pedo biologia*, 44, págs. 579-590

Bogdanov, Peter. 1996. Commercial Vermiculture: How to Build a Thriving Business in Redworms. VermiCo Press, Oregon. Pág. 83.

Bogdanov, Peter. 2004. "The Single Largest Producer of Vermicompost in the World". In Casting Call. 9(3). October. <http://www.vermico.com>

Chaparro, D, Zorro J. (2017). Prototipo de biorreactor aeróbico para el monitoreo y control del proceso de co-compostaje, a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Edwards, C.A. 1998. "The Use of Earthworms in the Breakdown and Management of Organic Wastes". In: Edwards, C.A. (ed) Earthworm Ecology. St. Lucie Press, Boca Raton. Págs. 327-354.

Fernández, O. (2017). Identifican 73 vertederos ilegales en Santiago y la mitad son peligrosos. La Tercera. Revisado el 4 de Septiembre del 2017. <https://www.latercera.com/noticia/identifican-73-vertederos-ilegales-santiago-la-mitad-peligrosos/>

Flores, Juan Pablo Espinosa, Marión Martínez, Eduardo Henríquez, Gabriel Avendaño, Pablo Torres, Patricio Ahumada, Isaac Retamal G., Marcelo Toledo H., Balfredo Marín A., Luz María (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. (Pub. CIREN N°139) CIREN. Pág. 31.

Gaddie, R.E. (Sr.) and Donald E. Douglas. 1975. Earthworms for Ecology and Profit. Volume 1: Scientific Earthworm Farming. Bookworm Publishing Company, Cal. Pág.180.

GARCIA, Juan. Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas. España. 2014. ISBN 84-607-9304-4.

GEORG, 2004. Feasibility of Developing the Organic and Transitional Farm Market for Processing Municipal and Farm Organic Wastes Using Large-Scale Vermicomposting. Good Earth Organic.

Gunadi, Bintoro, Charles Blount and Clive A. Edwards. 2002. "The growth and fecundity of *Eisenia fetida* (Savigny) in cattle solids pre-composted for different periods". In *Pedobiologia* 46, págs.15-23.

Hammermeister, A.M., P.R. Warman, E.A. Jeliaskova, R.C. Martin. 2004. "Nutrient supply and lettuce growth in response to vermicomposed and composted cattle manure". Submitted to *Bioresource Technology*, Dec, 2004.

INE, (2017). Instituto Nacional de Estadísticas (2017). Resultados CENSO 2017.

Jain S, Newman D. 2018. "Global food waste management: An implementation guide for cities" Recuperado de <https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2018/05/Global-Food-Waste-Management-Full-report-pdf.pdf>

Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO."

Mary anne a. Macabuhay, ma. Teresa r. Abellera and adel e. Ticsay, 2016. "Automated vermicast production with android application". *IAENG Transactions on Engineering Sciences*, pp. 179-192

Ministerio del Medio Ambiente presenta Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos que propone ambiciosa meta de reciclaje. (2020, Agosto 4) Recuperado de <https://mma.gob.cl/ministerio-del-medio-ambiente-presenta-estrategia-nacional-de-residuos-organicos-que-propone-ambiciosa-meta-de-reciclaje/>

Munroe G, “Manual of On-Farm Vermicomposting & Vermiculture” http://oacc.info/docs/vermiculture_farmersmanual_gm.pdf

Pajon, Silvio. No Date. “The Worm’s Turn – Argentina”. Intermediate Technology Development Group (ITDG), Case Study Series 4. <http://www.tve.org/ho/doc.cfm?aid=1450&lang=English>

Resources Group, Halifax, Nova Scotia. More information available from <http://www.alternativeorganic.com>.

Rink, Robert (Editor), 1992. Authors: Maarten van de Kamp, George B. Wilson, Mark E. Singley, Tom L. Richard, John J. Kolega, Francis R. Gouin, Lucien Laliberty, Jr., David Kay, D.W. Murphy, Harry A. J. Hoitink, W.F. Brinton. On-Farm Composting Handbook. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES-54), Ithaca, NY.

Rodríguez, S. (2015). Aplicación de métodos sistémicos para el desarrollo del diseño conceptual de un laboratorio de activación neutrónica. Universidad Técnica Federico Santa María.

Ruiz, C.y Cifuentes, M. (2021) La nueva matriz energética que mueve a Chile. La Tercera. Revisado el 13 de junio del 2021. <https://www.latercera.com/laboratoriodecontenidos/noticia/la-nueva-matriz-energetica-que-mueve-a-chile/5TWYWJAWFND25PWO6TIK2NI7XI/>

Subler, Scott, Clive Edwards and James Metzger. 1998. "Comparing Vermicomposts and Composts". In BioCycle, July. Págs. 63-66.

Urrutia, V (2017). Sistema modular para crear prototipos constructivos de manera fácil y rápida: caso de estudio en mediciones inteligentes. Universidad Técnica Federico Santa María.

Volkov et al 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 577 012018.

ANEXO

- **Dimensiones:** a continuación se presentan medidas aproximadas de las estructuras y elementos desarrollados.

Estructura de monitoreo

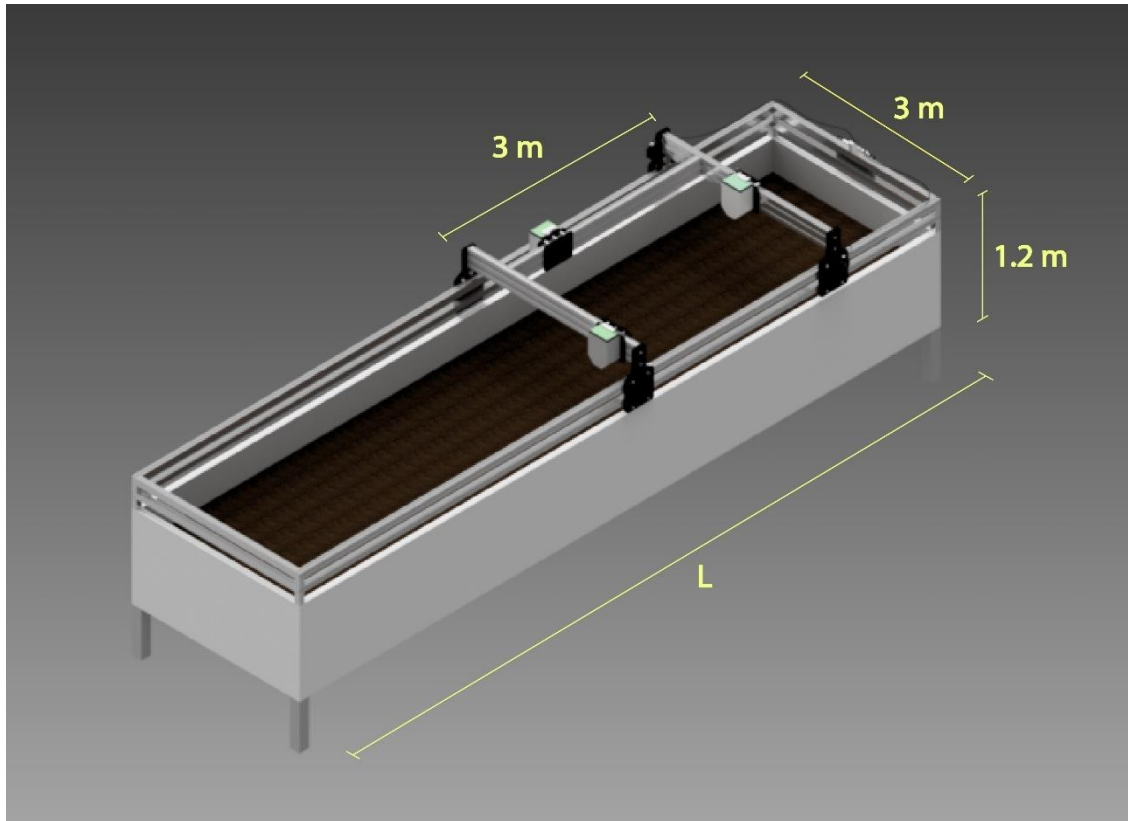


FIGURA 30: Dimensiones estructura de monitoreo.

La dimensión L de la Figura 30 va a dependerá de factores como la capacidad de planta, la cantidad de materia orgánica a tratar, mantención, presupuesto, entre otros. Se sugiere que la dimensión L sea al menos de 30 m para que la estructura de monitoreo pueda desplazarse lo suficiente y realizar a lo menos 10 mediciones por zona.

Contenedor de actuador lineal telescópico y sensores.

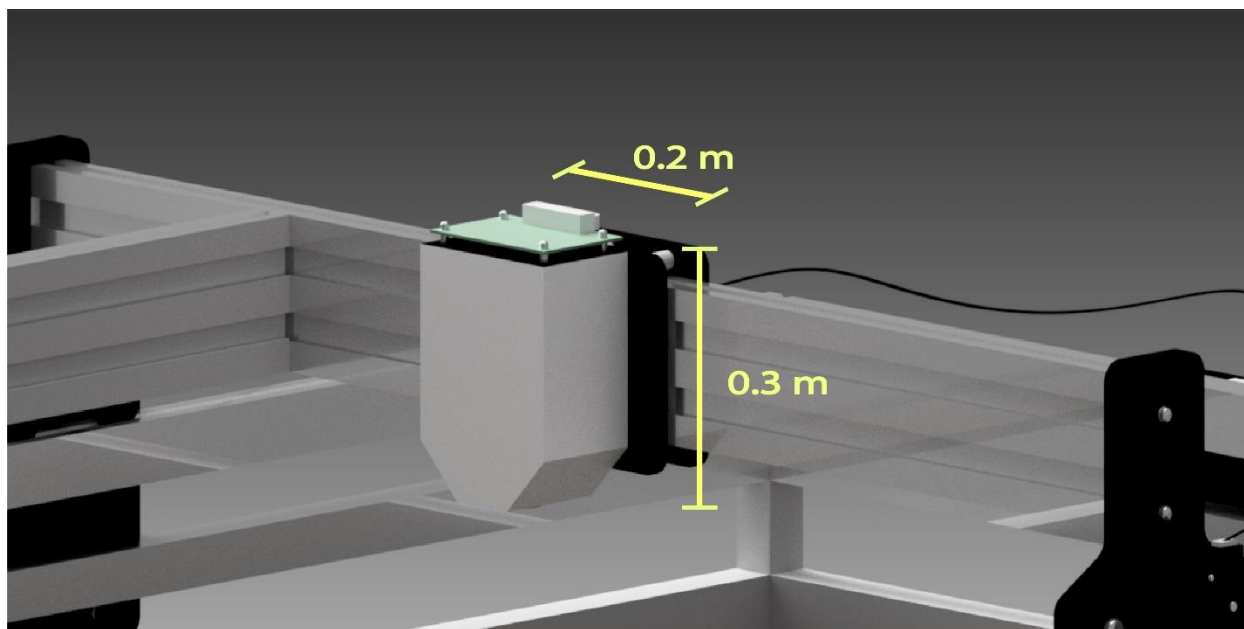


FIGURA 31: Contenedor de sensores y actuador lineal telescópico.

Actuador lineal telescópico

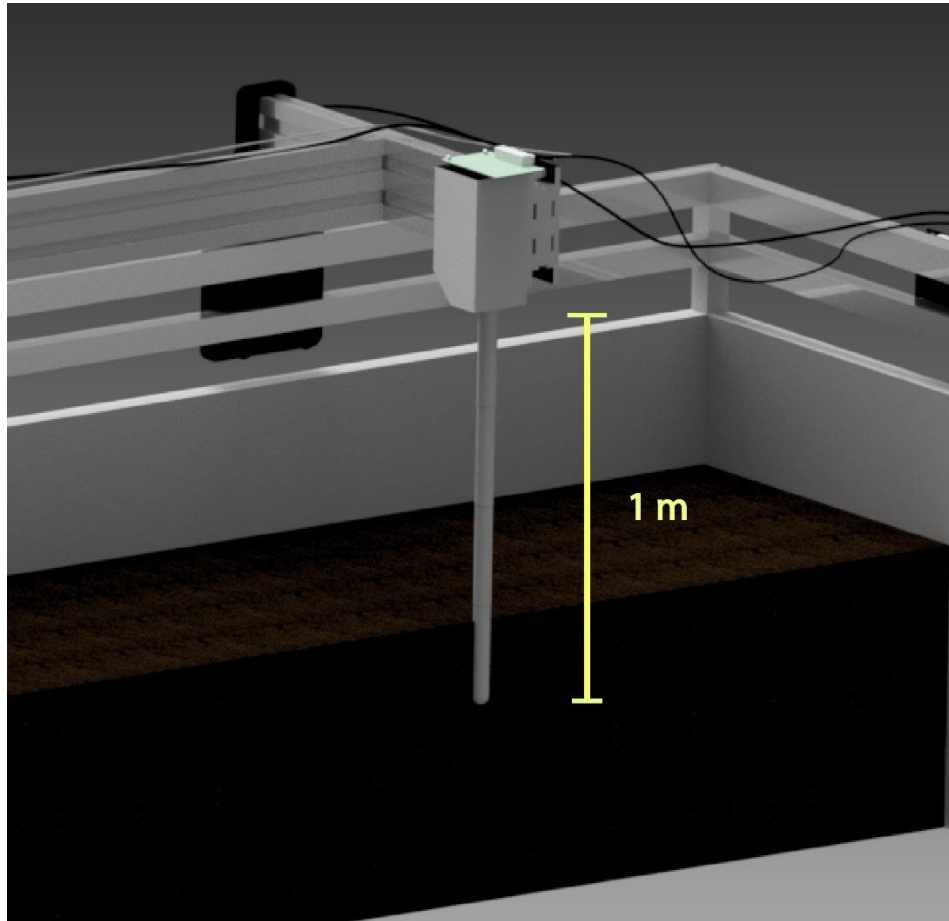


FIGURA 32: Largo del actuador lineal telescópico.

El actuador telescópico se compone de cuatro de tubos con una dimensión aproximada de 0.25 m. El diámetro aproximado del actuador es de 0.03 m.