

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE**



**“Diseño de sistema prototipo para optimizar
tratamiento y gestión de heces humanas en
sistemas de saneamiento seco”**

CRISTIAN ARMANDO ZÚÑIGA RODRÍGUEZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA:

DIPL. ING. UDO RHEINSCHMIDT

PROFESOR CORREFERENTE:

ING. PABLO SCHELE EGAÑA

MAYO 2019

Agradecimientos

A mis padres, hermanos y familia por haberme permitido la posibilidad de estudiar y acompañarme a lo largo de mi vida.

A mis amigos y personas que conocí en este camino

A mi Profesores Udo y Pablo.

Resumen

El siguiente documento presenta un estudio acerca de alternativas de saneamiento de heces en sistemas de saneamiento seco llamados “baños secos”. Se realiza una comparación y selección de alternativa, tomando en cuenta un contexto operacional y distintos factores considerados influyentes para la selección, tales como tiempo de tratamiento, efectividad del saneamiento, cuidado del medio ambiente y costos operacionales. Obteniendo como resultado la selección de un sistema de tratamiento por medio de la deshidratación solar.

Una vez elegida la alternativa de saneamiento, se continua con el diseño de un prototipo capaz de lograr un correcto saneamiento por medio del deshidratado solar. Estableciendo una estructura de funciones primarias y secundarias, lo cual facilita el proceso de diseño, enfocando el trabajo en las distintas subfunciones del sistema. Por lo tanto, se evalúan las configuraciones, construcción y materiales, por medio de matrices de decisión en las cuales se ponderan las distintas alternativas para finalmente seleccionar las que mejor se adapta a la exigencia del diseño.

Finalmente se diseña un bosquejo aproximado del prototipo y se procede a construir con la finalidad de poder probar su funcionamiento y encontrar posibles mejoras que hagan que el sistema funcione aun mejor. Las mediciones y el producto resultante en los meses de prueba, resultaron satisfactorios para la investigación. Se pudo obtener un producto en condiciones de saneamiento que aseguran un manejo del material sin peligro, desde un producto inicial que no cumplía con los requerimientos para considerarse saneado.

Abstract

The following document presents a study about stool sanitation alternatives in dry sanitation systems called "dry toilets". An alternative comparison and selection is made, taking into account an operational context and different factors considered influential for the selection, such as treatment time, sanitation effectiveness, care of the environment and operational costs. Obtaining as a result the selection of a treatment system by means of solar dehydration.

Once the sanitation alternative has been chosen, the design of a prototype capable of achieving a correct sanitation through solar dehydration is continued. Establishing a structure of primary and secondary functions, which facilitates the design process, focusing the work on the different subfunctions of the system. Therefore, the configurations, construction and materials are evaluated, by means of decision matrices in which the different alternatives are weighted to finally select those that best adapt to the design requirement.

Finally, an approximate sketch of the prototype is designed and it is proceeded to be built in order to prove its operation and find possible improvements that make the system work even better. The measurements and the resulting product in the test months were satisfactory for the investigation. It was possible to obtain a product under sanitary conditions that ensure a safe handling of the material, from an initial product that did not meet the requirements to be considered healthy.

Índice General

1.	Introducción	1
2.	Objetivos	3
2.1	Objetivo general	3
2.2	Objetivos específicos	3
3.	Antecedentes Generales	4
3.1	Problemática	4
3.1.1	Descripción del Problema	5
3.1.2	Identificación de causas	6
3.1.3	Propuesta de solución a problemática	7
3.2	Desafío.....	7
3.3	Fundación Ecosan.....	8
3.4	Población Rural	9
3.4.1	Habitantes.....	9
3.4.2	Origen de agua	10
3.5	Población Urbana	11
4.	Sistemas de saneamiento seco.....	12
4.1	Objetivos del tratamiento de heces en sistemas de saneamiento seco.....	16
4.1.1	Tratamiento térmico	17
4.1.2	Tratamiento alcalino.....	18
4.2	Microorganismos patógenos.....	19
4.2.1	Patógenos presentes en las heces	21
4.1.2	Aspectos biológicos a considerar	24

5.	Alternativas para el tratamiento de heces.....	26
5.1	Lumbricultura.....	26
5.2	Deshidratación y secado.....	28
5.3	Compostaje.....	30
5.4	Biodigestión.....	32
5.5	Incineración.....	33
5.6	Resumen.....	35
6.	Análisis y selección de alternativa.....	37
6.1	Metodología.....	37
6.2	Resultados.....	40
7.	Estado del arte deshidratadores solares.....	40
7.1	Energía Solar.....	40
7.1.1	Radiación Solar.....	41
7.1.2	Ubicación Geográfica.....	43
7.2	Instalaciones de energía solar térmica.....	45
7.2.1	Clasificación de los colectores solares.....	46
7.3	Conceptos básicos de aire atmosférico.....	49
7.3.1	Propiedades de aire atmosférico.....	50
7.4	Teoría del secado.....	52
7.4.1	Contenido de humedad.....	53
7.4.2	Humedad de equilibrio.....	55
7.4.3	Tipos de humedad en sólidos.....	56
7.4.4	Calor latente de vaporización.....	57

7.4.5	Curvas de secado de un producto.....	58
7.5	Propiedades psicrométricas	60
7.5.1	Variables	61
7.5.2	Evoluciones típicas del aire en un proceso de secado.....	62
7.5.3	Tiempo de secado.....	66
8.	Diseño de prototipo.....	68
8.1	Factores que afectan la aceptabilidad por parte de los usuarios.....	68
8.2	Establecimiento de la estructura de funciones.....	70
8.3	Análisis y selección de alternativas según funciones.....	72
8.3.1	Captar	72
8.3.2	Transmitir y transformar	75
8.3.3	Almacenamiento de energía.....	77
8.3.4	Datos y cálculos obtenidos.....	86
8.4	Contexto operacional.....	88
8.5	Cálculo aproximado de producción de heces para una familia	91
8.5	Diseño preliminar	93
8.5.1	Requerimientos del diseño de la cámara de secado	93
8.5.2	Limitaciones de la cámara de secado	93
8.5.3	Diseño esquemático	93
8.6	Comparación y selección de materiales	95
8.6.1	Aislación y almacenamiento de energía.....	95
8.6.2	Transmisión de energía en cubierta.....	98
8.6.3	Transformación de energía.....	100

8.7	Dimensiones	101
8.8	Modo de uso	104
9.	Resultados y estimaciones	106
9.1	Calor latente de vaporización	106
9.2	Calculo energía útil	107
9.3	Estimación temperatura de fluido de secado	107
9.4	Estimación de tiempo de secado.....	109
	Conclusiones	110
	Referencias.....	113
	Anexos	116
1.	Anexo 1: Materiales de construcción.....	116
2.	Anexo 2: Costos de materiales para prototipo	123
3.	Anexo 3: Prototipo Construido	125
4.	Anexo 4: Mediciones y gráficos	126

Índice de tablas

Tabla 1: Número de personas y porcentaje de población en censos según área	9
Tabla 2: Cobertura urbana de agua potable, según región	11
Tabla 3: Cobertura urbana de alcantarillado, según región.....	12
Tabla 4: Rutas de contaminación y medidas para ser evitadas	21
Tabla 5: Ejemplos de patógenos que pueden ser excretados en las heces	22
Tabla 6: Cuadro resumen de características de alternativas.....	35
Tabla 7: puntaje ponderado según tiempo que dura el tratamiento	37
Tabla 8: puntaje ponderado según aspectos medioambientales	38
Tabla 9: puntaje ponderado según disponibilidad del sistema.....	39
Tabla 10: puntaje ponderado según costos operacionales del proceso	39
Tabla 11: Radiación Solar Global Sobre Superficie Horizontal, media anual. [13] ...	43
Tabla 12: Clasificación de los tipos de concentradores solares	48
Tabla 13: Requerimientos y nivel de exigencias para el diseño	69
Tabla 14: Orientación según Angulo Azimut	73
Tabla 15: Resumen de selección según la función “Captación de energía”	75
Tabla 16: resumen de selección de alternativa para transmisión de energía.....	76
Tabla 17: Absorbencia de radiación solar y emisividad para diferentes materiales [20]	79
Tabla 18: Transmisividad para diversos materiales	79
Tabla 19: Tabla de parámetros para calculo	86
Tabla 20: calculo transferencia de calor hacia el aire	87
Tabla 21: Propiedades del aire a 20°C	87

Tabla 22: cálculo de números adimensionales	87
Tabla 23: Composición de las heces	92
Tabla 24: Ponderación según conductividad térmica.....	96
Tabla 25: Ponderación según inflamabilidad	96
Tabla 26: Ponderación según resistencia a la humedad	97
Tabla 27: Ponderación final ítem "aislación"	97
Tabla 28: Ponderación según transmisividad de material.....	98
Tabla 29: Ponderación según vida útil del material.	99
Tabla 30: Ponderación final ítem transmisión de energía en la cubierta	100
Tabla 31: propiedades de pintura negra	100
Tabla 32: Características de panel aislado	116
Tabla 33: Costos de construcción de prototipo	124

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Población rural en área urbana según región	10
Ilustración 2: Porcentaje de viviendas particulares ocupadas según área y origen del agua.	11
Ilustración 3: Representación de un baño seco.	13
Ilustración 4: Zona de seguridad en el tratamiento de excretas	18
Ilustración 5: Ruta de transmisión secundaria de patógenos en orina y heces humanas	20
Ilustración 6: Espectro electromagnético	42
Ilustración 7: Tipos de radiaciones incidentes	42
Ilustración 8: latitud ϕ y longitud L para una ubicación T.....	45

Ilustración 9: Esquema de colector y sus principales elementos	46
Ilustración 10: Proceso de secado en un producto	53
Ilustración 11: Curva de humedad en equilibrio	57
Ilustración 12: Curva de tiempo de secado	58
Ilustración 13: Curva de velocidad de secado	59
Ilustración 14: Carta Psicométrica	61
Ilustración 15: Evolución del aire en los procesos de secado	63
Ilustración 16: Diagrama de funciones principales y secundarias	71
Ilustración 17: Esquema de un panel solar donde se señalan los ángulos de inclinación y azimut.	73
Ilustración 18: Irradiación mensual y anual en diferentes inclinaciones y azimut [MJ/m ²]. [19]	74
Ilustración 19: Comportamiento de radiación solar incidente	78
Ilustración 20: Representación pérdidas térmicas a través de resistencias para panel con una cubierta	81
Ilustración 21: Representación gráfica de panel con una cubierta, y sus coeficientes de pérdidas	81
Ilustración 22: representación pérdidas térmicas a través de resistencias para panel con dos cubiertas	83
Ilustración 23: Diseño preliminar en software Autodesk Inventor	94
Ilustración 24: Perfil prototipo	102
Ilustración 25: Dimensiones bandeja	102
Ilustración 26: Perspectiva isométrica de prototipo	104
Ilustración 27: zona de seguridad en tratamiento térmico	106

Ilustración 28: balance de energía en placa absorbente.	108
Ilustración 29: Grafico Irradiancia solar [W/m ²] en sector de Laguna Verde.....	108
Ilustración 30: Dimensiones panel aislado.....	117
Ilustración 31: Cortes de panel aislado	117
Ilustración 32: Bandeja	118
Ilustración 33: Ducto.....	118
Ilustración 34: Ventana termo panel	119
Ilustración 35: Perfil Canal	120
Ilustración 36: Uniones de escuadra	120
Ilustración 37: Remache tipo Pop	121
Ilustración 38: Pernos.....	121
Ilustración 39: Extractor Solar	121
Ilustración 40: Pintura anticorrosiva negro opaco	122
Ilustración 41: Silicona de alta temperatura.....	122
Ilustración 42: Espuma Poliuretano expansiva	123
Ilustración 43: Burletes de goma	123
Ilustración 44: Manilla y madera	123
Ilustración 45: Prototipo construido, extremo de puertas	125
Ilustración 46: Prototipo construido, extremo extractores	125

Glosario

M_{wb} : humedad en base húmeda [kg agua / kg producto húmedo]

M_{db} : humedad en base seca [kg agua / kg producto seco]

W_o : peso inicial de material sin secar [kg],

W_w : cantidad de agua en el producto húmedo [kg]

W_d : peso de la materia seca en el producto [kg].

L_w : calor latente de vaporización del agua pura en [kJ/kg]

R : constante de los gases (8314 [J/kmol K])

M_w : peso molecular del agua (18,01 [kg/kmol])

T : la temperatura en [°C].

Q_u : Cantidad de energía transferida al fluido [W]

A_s : Área de incidencia solar [m^2]

G_t : Radiación [$\frac{W}{m^2}$]

τ : Transmisividad

α : Absorción de placa

\dot{m} : Flujo másico del aire que pasa por el panel [$\frac{kg}{s}$]

C_p : Calor específico del fluido [$\frac{Joule}{kg \cdot K}$]

T_o : Temperatura de salida del aire del panel [°C]

T_i : Temperatura de entrada del aire del panel [°C]

U_L : coeficiente Global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

F' : factor de remoción de calor local [-]

U_t : coeficiente de pérdida de la parte superior $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

U_b : Coeficiente de pérdida de energía a través de la parte inferior del colector $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

h : coeficiente de transferencia de calor por convección al aire $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

h_r : coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

1. Introducción

Según la OMS (Organización mundial de la salud) y UNICEF (Fondo de las naciones unidas para la infancia), 2,1 billones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable y 4.5 billones carecen de servicios de saneamiento gestionados de manera segura.

La falta de agua potable y alcantarillado genera serios problemas sanitarios y en Chile la cobertura no deja de ser preocupante. La Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas anunció el 2017 que 1,5 millones de habitantes viven sin tratamientos de aguas servidas y 500 mil sin agua potable.

Con relación al tratamiento de las excretas, actualmente existen sistemas capaces de llevar a cabo un manejo adecuado y sanitario de estos efluentes que pueden reemplazar las redes de alcantarillado y posterior tratamiento de aguas servidas en una planta convencional. Los denominados baños ecológicos secos constituyen una de las tecnologías apropiadas para la disposición, aislamiento, almacenamiento y tratamiento de las excretas. Esta tecnología y diseño surge de la idea de prevenir enfermedades junto la protección del medio ambiente y el cuidado de nuestros recursos acuíferos, además del hecho de poder cubrir la demanda existente de servicios sanitarios en lugares sin acceso.

Los baños secos son una tecnología apropiada, viable, oportuna y accesible económicamente. Culturalmente puede generar algún tipo de resistencia, por lo que la tarea de educación sanitaria y la capacitación técnica para su correcto uso deben concurrir en forma paralela.

Los problemas de rechazo y manejo inadecuado de las unidades se deben a un deficiente proceso de interacción entre la tecnología y el usuario, de aquí la necesidad de generar cambios en el comportamiento relacionado con la eliminación y disposición de excretas, además del uso y mantenimiento del sanitario.

El sanitario ecológico seco es una opción saludable y amigable con el medio ambiente, ya que es capaz de transformar las excretas humanas potencialmente dañinas en una materia inocua para la salud, aprovechando los ciclos biológicos para tratar las excretas humanas, lo que la hace una tecnología sustentable cuya construcción y operación es de bajo costo. Está basado en el principio del reciclaje, a través del aprovechamiento y recuperación completa de todos los nutrientes de las heces y orina para beneficio de la agricultura y la minimización de la contaminación y ahorro de consumo de agua.

Dicho lo anterior el propósito de este trabajo es optimizar mediante el rediseño una de las etapas importantes dentro del sistema de saneamiento ecológico, la cual es la deshidratación de las heces humanas mediante el secado, lo cual aportaría enormemente al aseguramiento de eliminación de agentes patógenos y mejora del tratamiento de excretas humanas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general diseñar un prototipo para el tratamiento de heces humanas generadas en un baño seco de una vivienda rural, con la finalidad de realizar una correcta gestión en el manejo de estos residuos, de manera de optimizar el proceso en cada vivienda donde se instale.

2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos contemplados para cumplir el propósito antes señalado son:

- Estudiar tecnologías existentes de baños secos y de tratamiento heces humanas como alternativa sanitaria.
- Identificar contexto operacional y parámetros de operación que influyen en el diseño del sistema de tratamiento de heces humanas.
- Analizar alternativas para el tratamiento de heces humanas y proceder a selección de alternativa que resuelva problemática.
- Implementar una matriz de decisiones para la selección del diseño más adecuado según ciertos criterios a evaluar.
- Diseñar prototipo de sistema de tratamiento de heces humanas.

3. Antecedentes Generales

3.1 Problemática

Para entender de buena forma el problema a resolver, es necesario seguir algunos pasos, de manera de poder describir y analizar lo mejor posible y de modo sencillo el problema. Los pasos por seguir serán:

- **Identificación:** reconociendo que hay una situación que quiere solucionarse.
- **Describir el problema:** En esta etapa es necesario recabar información para poder describir el problema de la manera más correcta y veraz, ayudado por técnicas como: análisis de datos e investigación.
- **Identificar causas:** Aquí se busca la causa original del problema. Identificar las fuerzas que contribuyen a que el problema agrave. Luego entre las posibles causas será posible eliminar los efectos derivados de las mismas.
- **Propuesta de solución:** Su objetivo es otorgar alternativas concebibles. Lo que se busca son estrategias que se dirijan hacia la causa original y resuelvan el problema de una vez por todas.

3.1.1 Identificación

Se ha identificado que hay una problemática en la gestión de los desechos en sistemas de saneamiento de heces de los sectores rurales. Un gran porcentaje de estos sistemas no son lo suficiente seguros para la salud de las personas, ya que es posible que se encuentren en presencia de agentes patógenos. También se debe tener en cuenta que los desechos obtenidos de estos procesos deben ser devueltos al medio ambiente de forma segura, lo que actualmente en algunos sistemas no es logrado, causando contaminación a los recursos acuíferos cercanos.

3.1.1 Descripción del Problema

De acuerdo con el Programa de Monitoreo Conjunto (JMP, por su sigla en inglés) de la UNICEF y la OMS (Organización mundial de la Salud), aproximadamente 2.500 millones de personas carecen de acceso a instalaciones sanitarias mejoradas, y 1.100 millones todavía defecan a cielo abierto.

La ingestión de patógenos a través de comida y agua contaminada, y la transmisión fecal-oral son una causa principal de enfermedades y muertes prevenibles, los efectos de un saneamiento inadecuado, la carencia de higiene y las enfermedades diarreicas pueden tener efectos importantes en el organismo. Se puede decir que actualmente aún falta difundir conocimiento y prácticas críticas de higiene, tales como el lavado de manos luego del uso del baño, e incluir a estas prácticas de saneamiento.

Los pozos de letrina son comunes en países en desarrollo debido a su bajo costo y al hecho de que su operación es sencilla y no requiere de agua. Sin embargo, éstas pueden esparcir contaminación a los recursos acuíferos, especialmente en áreas urbanas y en aquellas zonas factibles de sufrir inundaciones. Además, se encarecen cuando se contemplan los costos del mantenimiento que remueva barros o excavaciones de nuevos pozos si no pueden ser vaciados. Como desventaja adicional suelen estar contruidos fuera y lejos de la casa principal para evitar malos olores.

Por otra parte, el acceso limitado al agua y los costos elevados de la infraestructura, operación y mantenimiento necesarios hacen que el saneamiento basado en alcantarillado sea impracticable en muchas regiones. Los sistemas basados en agua diluyen las excretas y generan grandes volúmenes de efluentes que requieren la construcción de sistemas de tratamiento de alta tecnología y alto costo. Se estima que el 90% de las aguas negras en los países en vías de desarrollo se vierten en cuerpos acuíferos potables, por lo tanto, deben ser tratados antes de su descarga. [1]

3.1.2 Identificación de causas

Las causas que contribuyen al problema son varias y de distintos indoles, se identifican y describen las siguientes:

- 1. Falta de desarrollo en sectores rurales:** en estos sectores en mayor parte no existe la presencia de alcantarillados ni el acceso a red pública de agua potable, lo cual hace que las personas tengan que buscar alternativas a estos servicios.
- 2. Falta de información:** hay un desconocimiento de la existencia de soluciones alternativas de saneamiento, así como también la falta de información acerca de las condiciones inapropiadas a las que están expuestas las personas al no contar con un sistema de saneamiento seguro.
- 3. Elevados costos de sistemas de saneamiento convencionales:** frente a la condición de densidad poblacional baja existente en la mayor parte de los sectores rurales, se hace muy costoso el hecho de instalar redes de alcantarillados y red pública de agua potable.
- 4. Rechazo social de soluciones alternativas:** Esta causa es considerada una de las más relevantes. La adopción exitosa de estas tecnologías (ecológicas) está vinculada a: La motivación y voluntad de los usuarios para cambiar hábitos y conductas, como por ejemplo la disposición de los hombres para orinar sentados en caso de que no haya mingitorios especiales. Además de los preconceptos culturales, el miedo a posibles olores es un obstáculo más para la aceptación social.
- 5. Desarrollo tecnológico de soluciones alternativas:** para el caso de los sistemas de saneamiento seco, es necesario avanzar en diseños que aporten a la aceptación social y además a otorgar un saneamiento de mayor eficiencia.

3.1.3 Propuesta de solución a problemática

Una vez definido el problema, es posible realizar la propuesta que otorgue una solución. Se propone realizar un mejoramiento de un sistema de saneamiento seco por medio del diseño de un prototipo, el cual contribuya a aumentar la aceptación social y también en desempeño funcional de éste, de modo de asegurar el saneamiento de esta tecnología y mejorar su eficiencia.

Los sistemas de baños secos se encargarán de un tratamiento primario tiene lugar en la cámara de heces, el cual reduce sustancialmente la carga de patógenos fecales, permitiendo que la materia tratada sea más segura de manejar. Cuando está diseñado y mantenido correctamente, un baño seco con separación de orina puede evitar el contacto con patógenos y reducirlos al punto tal que es seguro manipular las cámaras al momento de vaciarse.

Sin embargo, cabe destacar que la remoción completa de patógenos, incluyendo la inactivación total de los huevos de helmintos, no puede ser garantizada en circunstancias normales por ningún sistema de este tipo de baños. Si bien la reducción de patógenos convierte a la manipulación de estos residuos en algo seguro, es absolutamente imprescindible cumplir rigurosamente todos los estándares de seguridad al momento de vaciar la cámara de heces, dados los riesgos para la salud que la carga residual de patógenos acarrea.

Es por esto por lo que la problemática tiene relación con la disposición final del producto y se hace un tratamiento posterior para reducir aún más la carga de patógenos y estabilizar el material.

3.2 Desafío

El desafío planteado por la fundación ECOSAN consiste en diseñar un producto que sea capaz de otorgar el saneamiento seguro de excretas humanas y generar buenas prácticas de gestión de estos residuos. Este desafío se centra en la población rural y

en zonas de campamentos dentro de ciudades, personas que se encuentran ajenos a los servicios de alcantarillado y/o presenta sistemas de saneamiento que no son los óptimos. Esto no ha sido resuelto debido a la ausencia de servicios municipales, por la falta de conocimientos, entre otros motivos, provocando así que exista un déficit en calidad de vida.

Actualmente la población rural y pertenecientes a campamentos no resuelve este problema, y optan por alternativas no del todo recomendables y poco higiénicas como el uso de letrinas y construcción de pozos negros, contribuyendo a la contaminación de aguas subterráneas y generando un gasto del recurso hídrico.

Por estas razones es que se plantea el desafío de generar una propuesta de autogestión sostenible para familias rurales y pertenecientes a campamentos, enfocado en el manejo y tratamiento de estos residuos.

3.3 Fundación Ecosan

La Fundación Ecosan aborda el desarrollo sostenible desde el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente, como pilares interdependientes que se refuerzan mutuamente. Entiende un modelo de saneamiento sostenible de forma holística, que, en orden para ser sostenible, además debe ser socialmente aceptable, tecnológicamente apropiado y económicamente viable.

Comprende el manejo sanitario del agua potable, aguas residuales y excretas, residuos sólidos, reutilización y/o reciclaje, el comportamiento higiénico, entre otros temas que tienen por objetivo reducir los riesgos para la salud, prevenir la contaminación y favorecer el uso sostenible de los recursos.

La Fundación Ecosan posee una línea de productos y servicios orientada a la gestión de residuos humanos. El principal usuario se define como una familia rural de zonas dispersas, de preferencia de escasos recursos o con un alto interés por el respeto al medio ambiente.

Ecosan es una fundación que ha diseñado y producido sanitarios ecológicos, especialmente pensado para las zonas rurales y sectores empobrecidos. Entrega un producto que permite la gestión sostenible de los residuos sanitarios domiciliarios. Este producto hecho en plástico en fábrica permite reducir el costo de los proyectos sanitarios familiares que actualmente podría ejecutar la Fundación.

Además, permitiría que, con los conocimientos generales de construcción, con mano de obra local o por el mismo usuario incluso, se pueda construir un cuarto de baño que opere con alta autonomía, bajo impacto económico y ambiental, en lugares que por situación geografía, hay escasez de agua.

3.4 Población Rural

Dado que el sistema que se tiene por objetivo diseñar, tiene como principal destinatario a las personas ubicadas en sectores rurales, es necesario tener en cuenta datos que sirvan de apoyo para la realización del proyecto, y sirvan de respaldo a la definición de la problemática. Para ello se utilizarán datos obtenidos del Censo 2017, tales como la cantidad de habitantes ubicados en áreas rurales, y también el origen del agua.

3.4.1 Habitantes

La siguiente tabla muestra una comparación de cantidad de habitantes en áreas rurales y urbanas, según datos obtenidos en Censo 1992, 2002 y 2017.

Tabla 1: Número de personas y porcentaje de población en censos según área

Área	Censo 1992		Censo 2002		Censo 2017	
	N	%	N	%	N	%
Urbana	11.140.405	83,5	13.090.113	86,6	15.424.263	87,8
Rural	2.207.996	16,5	2.026.322	13,4	2.149.740	12,2
Total	13.348.401	100	15.116.435	100	17.574.003	100

La población efectivamente censada que reside en el área rural pasó de representar 16,5% en 1992 a 12,2% en 2017.

La Araucanía tiene el mayor porcentaje de población (29,1%) en el área rural, pero la futura Región de Ñuble ocupará el primer lugar, con 30,6% de su población en esa área, tal como muestra el siguiente gráfico:

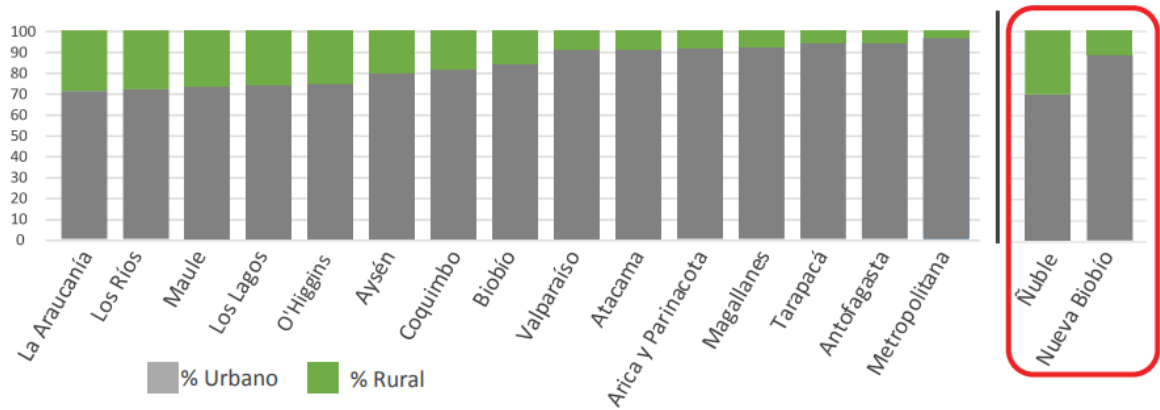


Ilustración 1: Población rural en área urbana según región

3.4.2 Origen de agua

Del total de viviendas particulares ocupadas, 93% obtiene el agua a través de red pública, 4% la saca de pozo o noria y 3%, de otro medio. En el área urbana, 98,8% de las viviendas utiliza red pública, pero en el área rural 27,7% ocupa pozo o noria, 7,2%, camión aljibe y 12,2%, de río, vertiente, estero, canal o lago. [2]

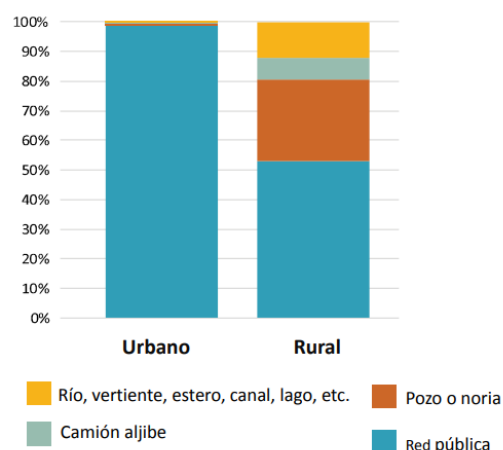


Ilustración 2: Porcentaje de viviendas particulares ocupadas según área y origen del agua.

3.5 Población Urbana

A modo de comparación a continuación se presenta una tabla que arroja la cobertura de agua potable de habitantes pertenecientes a zona urbana. [2]

Tabla 2: Cobertura urbana de agua potable, según región

REGIÓN	Población urbana abastecida con agua potable (número)	Cobertura urbana de agua potable (%)
TOTAL	17.337.785	99,92%
Arica y Parinacota	225.116	99,99%
Tarapacá	336.037	99,92%
Antofagasta	640.256	100,00%
Atacama	286.403	99,74%
Coquimbo	686.258	99,95%
Valparaíso	1.708.377	99,42%
Metropolitana	8.120.884	100,00%
O'Higgins	748.165	99,99%
Maule	752.208	99,96%
Biobío	1.994.132	99,99%
La Araucanía	675.278	99,83%
Los Ríos	270.263	100,00%
Los Lagos	644.768	100,00%
Aysén	91.279	100,00%
Magallanes y de la Antártica Chilena	158.362	100,00%

Por otro lado, se observa en la siguiente tabla la cobertura de alcantarillado en la población según región, en donde se puede ver que un pequeño porcentaje no menos importante no posee este servicio, lo cual puede deberse en gran parte viviendas ubicadas en campamentos. [2]

Tabla 3: Cobertura urbana de alcantarillado, según región

REGIÓN	Población urbana saneada con alcantarillado (número)	Cobertura de alcantarillado (%)
TOTAL	16.800.847	96,83%
Arica y Parinacota	224.411	99,68%
Tarapacá	328.493	97,67%
Antofagasta	638.902	99,79%
Atacama	279.201	97,23%
Coquimbo	664.103	96,72%
Valparaíso	1.594.822	92,82%
Metropolitana	8.022.447	98,79%
O'Higgins	665.819	88,98%
Maule	726.843	96,59%
Biobío	1.895.731	95,06%
La Araucanía	645.572	95,44%
Los Ríos	253.791	93,90%
Los Lagos	616.954	95,68%
Aysén	87.845	96,24%
Magallanes y de la Antártica Chilena	155.913	98,45%

4. Sistemas de saneamiento seco

Los sistemas de saneamiento seco, también llamados por su forma más simple, baños secos o baños ecológicos, básicamente son inodoros que operan sin el uso de agua para la descarga de las excretas humanas (orina y heces).

Se caracteriza por tener un inodoro y un separador en su interior, que tiene el objetivo de separar las heces de la orina.

A este sistema se le reconoce también por ser amigable con el medio ambiente por distintos motivos, por una parte, ya que todos los residuos que se producen al usar baño, como lo son heces y orina, no entran en contacto con el suelo y el agua, antes de ser tratados. Y además es posible usarlos posteriormente para preparar compostaje como abono y para regar; por otra parte, porque al usar este sistema, el inodoro no consume agua, de esta manera cuidamos este recurso cada vez más escaso en distintos sectores, por consiguiente, ayuda en nuestra economía ya que reduce nuestro gasto en consumo de agua.

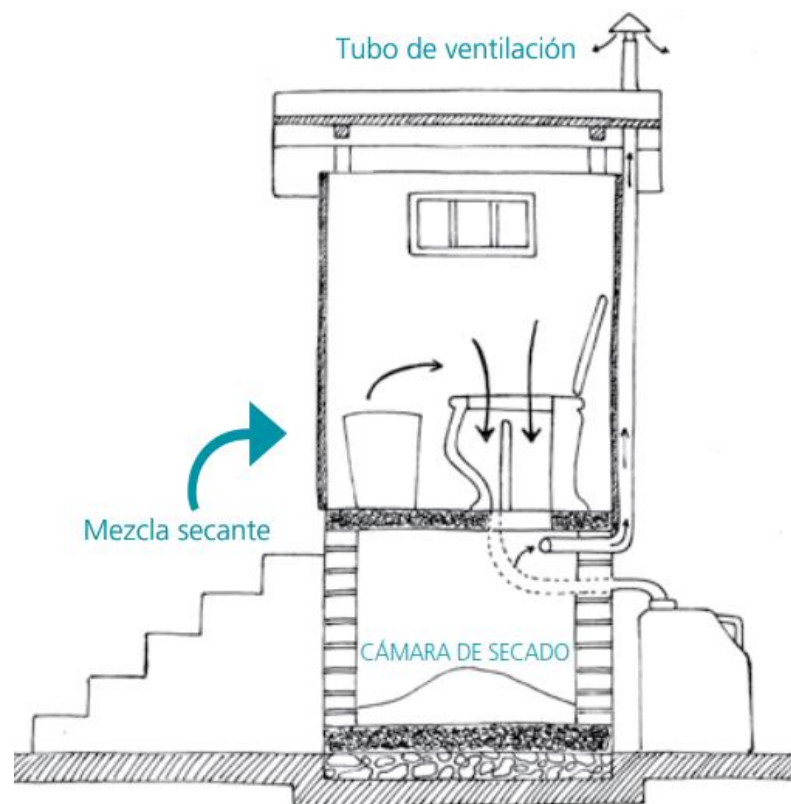


Ilustración 3: Representación de un baño seco.

Las heces caen a unas cámaras o contenedores y son tratadas con material secante “tierra y ceniza”. La orina contiene una menor cantidad de patógenos que las heces, y para su tratamiento es separada de las heces; en algunos sistemas son tratadas junto con las aguas grises (provenientes del lavado y ducha).

Las heces y la orina, contienen nutrientes como nitrógeno, fosfato y potasio, indispensables para el buen crecimiento de las plantas. Al usarlos como fertilizante se aprovecha su valor nutritivo, principalmente de la orina, que contiene la mayor cantidad de todos ellos. Las heces por su parte posterior a su tratamiento, es posible incorporarlas como fertilizante a la tierra.

Sus componentes principales son los siguientes:

El water o eco-inodoro: muy parecido a los “WC” convencionales, con la diferencia que tiene un separador para las heces y un separador para la orina.

Cámaras de secado: donde se depositan las heces hasta transformarse en abono natural, libre de microorganismos. Se le conoce a este como tratamiento primario.

La mezcla secante o agregado: Es la combinación de tierra y ceniza que se utiliza para cubrir las heces cada vez que se usa el sanitario.

Tubo de ventilación: Es un tubo que se coloca dentro o fuera del baño, con el objetivo de ventilar la cámara y evitar al mismo tiempo olores

El urinario: se utiliza opcionalmente para mayor comodidad de los varones de la familia, y evitar que ingresen líquidos a la cámara de heces cuando se usa el inodoro.

El recolector de orina: consiste en un bidón u otro recipiente cerrado, que permite almacenar la orina para poder usarla como fertilizante natural.

Las ventajas de estos sistemas son las siguientes:

- Los baños secos con separación de orina y uriniales secos no utilizan agua, al contrario de los inodoros comunes que usan entre 3 y 12 litros por descarga y los uriniales de 1 a 4 litros.
- La recolección de orina puede ser usada, con un tratamiento previo, como fertilizante. La orina es un fertilizante líquido rico en nitrógeno y fósforo, lo

que es de particular importancia para los agricultores que no pueden costear fertilizantes minerales.

- Puede que en un futuro a mediano plazo sea necesario el reciclaje de fósforo a partir de la orina, y este proceso es mucho más sencillo si la orina se recolecta en estado puro y no mezclado con otras aguas grises. El fósforo es un elemento central en la producción agrícola, que o bien ya se encuentra en el suelo o se lo agrega mediante fertilizantes, que son producidos de depósitos de roca fosfática. Estos depósitos se están acabando: a los niveles actuales de explotación (que se incrementan un 3% por año), las reservas económicas de fósforo no durarán más de 50 años.
- La separación de orina puede generar oportunidades de negocio en los sectores privados, a través de la venta de tecnología de separación de orina y heces, y servicios vinculados a ella.
- Cuando la orina y las heces no se mezclan, hay una disminución significativa de los olores. Dado que los baños secos con separación de orina no emiten olores si se diseñan y operan correctamente y que no necesitan contacto con el suelo para la infiltración de líquidos, pueden ser instalados en interiores, lo que lleva a un incremento en la seguridad, privacidad y confort del usuario.
- No hay producción de barros fecales húmedos. Cabe destacar que, si las heces son recolectadas de forma seca, separadas del agua y la orina, no son ofensivas a los sentidos, especialmente después de un proceso prolongado de secado. Por eso es mucho más fácil vaciar la cámara de heces de un baño seco con separación de orina que el pozo de una letrina.
- Los pozos negros y letrinas están diseñados para filtrar líquidos en los suelos, lo que puede conducir a contaminación si hay una alta densidad poblacional. Por otro lado, los baños secos con separación de orina recolectan todo por sobre el nivel del suelo en recipientes impermeables, con lo que no contaminan las napas. En este punto cabe resaltar que la disposición final de

aguas grises sí puede contaminarlas, y los baños secos con separación de orina no se enfocan en este problema.

4.1 Objetivos del tratamiento de heces en sistemas de saneamiento seco

El objetivo del tratamiento de estos baños es obtener un producto seco, inodoro, inofensivo y saneado que pueda ser manipulado de forma segura al momento de vaciar la cámara o de su disposición final o reutilización. El tratamiento de las heces comienza en la recolección y continúa durante el período de almacenamiento, y los cuatro factores más importantes para el tratamiento son el contenido de humedad, tiempo de almacenamiento, elevación de temperatura y valor de pH.

De estos factores mencionados, la humedad, la duración de almacenamiento y en parte la temperatura son los más controlables, se debe tener en cuenta que mientras el método sea controlable, el tratamiento será en consecuencia confiable como método secundario de tratamiento en un baño seco con separación de orina.

La deshidratación describe la pérdida de humedad en las heces en un cierto período de tiempo. El contenido de humedad en las heces frescas es de aproximadamente 80% y decrece gradualmente a lo largo del proceso de recolección y almacenamiento, evacuándose el vapor de agua por los caños de ventilación del baño (en caso de haber sido diseñado de esta forma). La mayor parte de la muerte de los patógenos en el tratamiento ocurre en el proceso de deshidratación. Ésta también provoca cambios físicos en las heces, desde el cambio en la textura hasta el abatimiento del olor, lo que lo hace menos ofensivo de manipular.

La adición de material seco de cobertura colabora con la deshidratación, absorbiendo la humedad de las heces. Sin embargo, este proceso sólo se da efectivamente si las cámaras proveen las condiciones apropiadas (ambiente seco y almacenamiento prolongado).

La OMS recomienda un contenido de agua menor al 25% a la hora del tratamiento en su almacenado. Cuando se logra un nivel de humedad menor al 25%, resulta en el saneamiento completo de las heces y muerte de los huevos de helmintos; sin embargo, estos niveles no pueden ser obtenidos sin que haya condiciones muy cálidas, áridas y tiempos muy prolongados de almacenamiento. [2]

4.1.1 Tratamiento térmico

El calor es una de las maneras más efectivas de los patógenos y es un parámetro usado para alcanzar la inactivación en la mayoría de los procesos aplicados, por ejemplo, en el tratamiento de lodos residuales. La inactivación de patógenos se traza en función de la temperatura y el tiempo. Esto crea y define una zona de seguridad.

Si la relación correspondiente tiempo-temperatura es alcanzada en todo el material expuesto, se puede considerar microbiológicamente seguro para su manipulación y uso. Por ejemplo, si una temperatura $>50^{\circ}\text{C}$ es alcanzada por uno o varios días, una inactivación eficiente ha ocurrido.

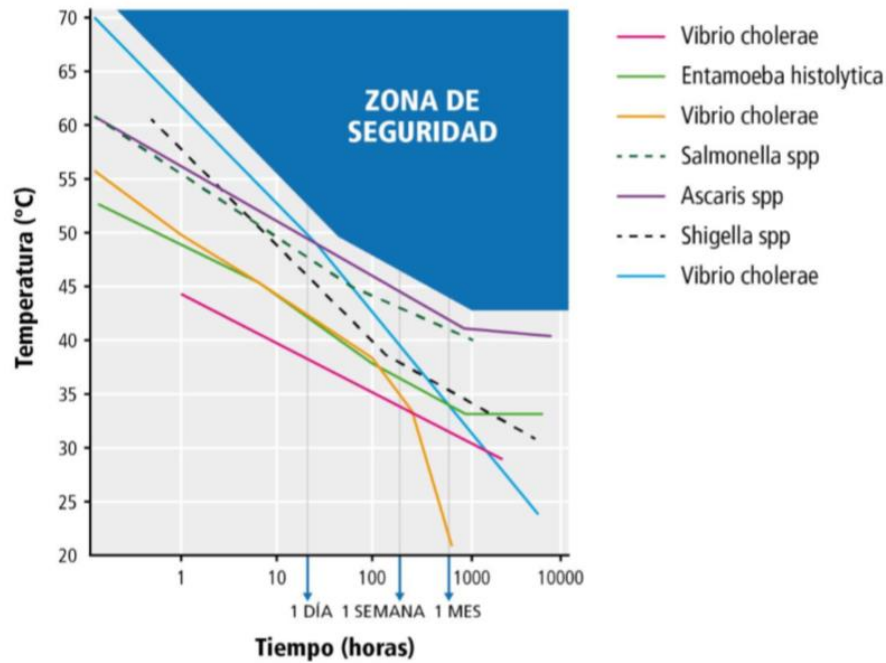


Ilustración 4: Zona de seguridad en el tratamiento de excretas

4.1.2 Tratamiento alcalino

La mayoría de patógenos prefieren un pH neutro, es decir alrededor de 7. Un pH de 9 o superior reducirá la carga de patógenos con el tiempo, pero para obtener una rápida inactivación es deseable un pH de 11-12 en los tratamientos donde se añade cal (por ejemplo, para el tratamiento de los lodos residuales).

La adición de ceniza o cal a la excreta, practicada desde hace mucho tiempo, tiene algunos beneficios:

- Reduce el mal olor.
- Cubre el material, lo que reduce el riesgo de moscas y mejora las condiciones estéticas.
- Reduce el contenido de humedad.

- Promueve el decrecimiento de los patógenos a través del efecto del pH alto.

Los resultados de un estudio realizado en baños secos en Vietnam muestran que es posible alcanzar una eliminación total de patógenos dentro de un período de seis meses si una o dos tazas de ceniza son añadidas después de cada uso (excreción). Paralelamente en estudio realizado en China, las cenizas vegetales fueron mezcladas con heces en una relación de 1:3 y produjeron un pH de 9-10. [3]

La adición de un químico elevador de pH tendrá varios beneficios y tiene el potencial de inactivar patógenos. Las condiciones para lograr una remoción total de patógenos pueden variar debido a circunstancias locales. A gran escala, el tratamiento secundario del material recolectado, puede funcionar como una barrera adicional de tratamiento, dando como resultado un nivel más alto de seguridad, cuando el material es usado como un fertilizante.

Los aditivos y una mezcla adicional con material rico en energía pueden afectar el compostaje secundario y el material ácido debe ser validado. No se recomienda, de acuerdo a las prácticas chinas, añadir cenizas vegetales como material absorbente a la materia fecal cuando esta será compostada, puesto que podría darse una pérdida mayor de nitrógeno.

4.2 Microorganismos patógenos

Existen cuatro grandes grupos de microorganismos que pueden ser transmitidos a través del ambiente y causar enfermedades infecciosas los cuales son: bacterias, protozoos, virus y helmintos.

La transmisión de infecciones puede ser directa a través de las distintas formas de contacto persona a persona, incluyendo la vía aérea a corta distancia; o indirecta (secundaria), que incluye un vector de contagio, vía aérea de larga distancia y parenteral.

Las rutas de transmisión secundarias se ilustran en el siguiente cuadro, y pueden definirse a grandes rasgos bajo la categoría fecal-oral, dado que involucran la ingestión o la inhalación de patógenos.

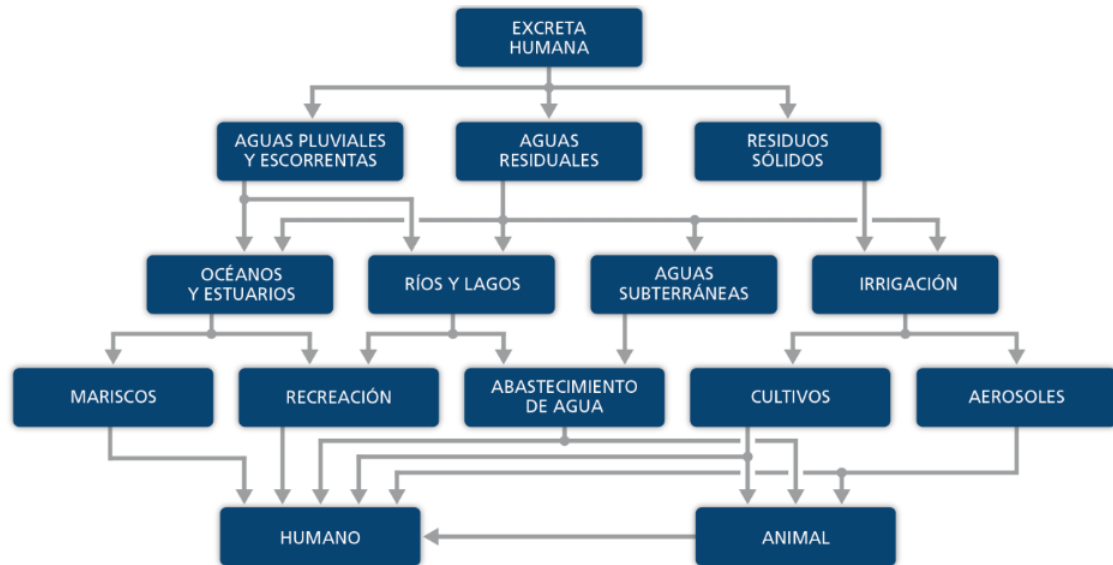


Ilustración 5: Ruta de transmisión secundaria de patógenos en orina y heces humanas

Para los sistemas de saneamiento de agua, las aguas residuales son una fuente potencial importante de ruta de transmisión cuando aguas residuales no tratadas son descargadas en un curso de agua o usadas en un área cultivable. Los inodoros secos tienen menos probabilidades de afectar las aguas superficiales o subterráneas. Este puede ser el caso si son construidos o localizados indebidamente.

Para letrinas excavadas, como letrinas de fosa, se han identificado problemas con el transporte de patógenos de la excreta a las aguas subterráneas en áreas con altos niveles freáticos, o debido a las características del suelo que pueden favorecer el transporte microbiano.

En la siguiente tabla se listan las posibles rutas de exposición y de transmisión relacionadas con los inodoros secos junto con estas se enumeran algunas medidas a ser consideradas para evitar la exposición.

Tabla 4: Rutas de contaminación y medidas para ser evitadas

Área o procedimiento de lugar a la exposición de patógenos	Rutas de transmisión	Medidas técnicas	Medidas de comportamiento
Inodoro	Contacto directo, transporte a las aguas subterráneas, contaminación ambiental	Agua disponible para el lavado de manos, cámara de recolección elevada, cámaras de recolección impermeabilizadas	Lavado de manos, mantener el agua del inodoro limpia
Manejo primario Recolección y transporte	Contacto directo	Cenizas, cal u otro medio para reducir los microorganismos en el inodoro seco, personas informadas recolectan y transportan la excreta	Usar guantes, lavado de manos, adición de cenizas, cal u otro medio para reducir el contenido microbiano durante el uso
Tratamiento	Contacto directo, contaminación ambiental	Elección adecuada de la ubicación, tratamiento en sistemas cerrados, material informativo y señalización en el sitio	Usar guantes y ropa protectora, lavado de manos, evitar el contacto en las zonas de tratamiento
Manejo secundario aplicación, fertilización	Contacto directo	Agricultores informados reutilizan la excreta, equipo especial disponible	Usar guantes, lavado de manos, evitar el contacto en las zonas de tratamiento
Campo fertilizado	Contacto directo, transporte a las aguas superficiales o subterráneas	Trabajando con la excreta dentro de la tierra, material informativo y señalización	Evitar campos recién fertilizados
Cultivo fertilizado	Consumo, contaminación de la cocina	Elección del cultivo adecuado	Apropiada preparación y cocción de los productos alimenticios, limpieza de las superficies de la cocina y los utensilios

4.2.1 Patógenos presentes en las heces

Más de 120 tipos de virus pueden ser excretados por las heces, siendo los grupos más comunes los de enterovirus, rotavirus, adenovirus entéricos y calicivirus humanos. La Hepatitis A es considerada como un virus patógeno de gran preocupación cuando se aplica los desechos a la tierra y es catalogado como un riesgo para brotes de enfermedades relacionados con el agua y los alimentos, especialmente donde las normas de sanidad son bajas.

Entre las bacterias, la Salmonella, Campylobacter y la E. Coli enterohemorrágica (EHEC) son generalmente de importancia, tanto en países industrializados como en desarrollo, cuando se evalúan los riesgos microbianos de varios productos fertilizantes incluidas las heces, los lodos residuales y el estiércol animal.

Los protozoarios, *Cryptosporidium parvum* y *Giardia lamblia intestinalis* han sido estudiados intensamente debido a su alta resistencia ambiental y bajas dosis infecciosas, el *Cryptosporidium* por su asociación con algunos brotes grandes de enfermedades relacionadas con el agua, y la *Giardia* por su alta prevalencia como patógeno entérico. *Entamoeba histolytica* es también reconocida como una infección de cuidado en países en desarrollo. La importancia general de otros como la *Cyclospora* e *Isospora* está siendo debatida actualmente. [4]

En los países en desarrollo, las infecciones por los helmintos son de gran preocupación. Los huevos (óvulos) especialmente de *Ascaris* y *Taenia* son muy persistentes en el ambiente y por eso se los considera como un indicador de la calidad higiénica [4]. En la siguiente tabla se muestran ejemplos típicos de organismos patógenos que se pueden encontrar en la fecas, y las enfermedades que pueden causar.

Tabla 5: Ejemplos de patógenos que pueden ser excretados en las heces

Grupo	Patógeno	Enfermedad-Síntomas
Bacteria	<i>Aeromonas spp.</i>	Enteritis
	<i>Campylobacter jejuni/coli</i>	Campilobacteriosis: Diarrea, calambres, dolor abdominal.
	<i>Escherichia coli</i> (EIEC, EPEC, ETEC, EHEC)	Enteritis
	<i>Pleisiomonas shigelloides</i>	Enteritis
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bacteriemia, infecciones de la piel, otitis, meningitis.
	<i>Salmonella typhi/paratyphi</i>	Fiebre tifoidea y paratifoidea: Dolor de cabeza, anorexia, bradicardia.
	<i>Salmonella spp.</i>	Salmonelosis: Diarrea, fiebre, calambres abdominales.
	<i>Shigella spp.</i>	Shigelosis: Disentería, vómitos, calambres, fiebre.
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera: Diarrea acuosa, grave y mortal si no recibe tratamiento.
Virus	<i>Yersinia spp.</i>	Yersinioses: Fiebre, dolor abdominal, diarrea, dolor en articulaciones, erupción.
	<i>Adenovirus</i>	Enfermedad respiratoria
	<i>Enteric adenovirus 40 y 41</i>	Enteritis
	<i>Astrovirus</i>	Enteritis
	<i>Calicivirus</i> (incl. <i>Norovirus</i>)	Enteritis
	<i>Coxsackievirus</i>	Enfermedad respiratoria, enteritis, meningitis.
	<i>Echovirus</i>	Meningitis aséptica, encefalitis, a menudo asintomático
	<i>Enterovirus</i> tipos 68-71	Meningitis, encefalitis, parálisis.
	<i>Hepatitis A</i>	Hepatitis: Fiebre, anorexia, náuseas, ictericia.
	<i>Hepatitis E</i>	Hepatitis.
	<i>Poliovirus</i>	Poliomelitis: A menudo asintomática, fiebre, náuseas, vómito, parálisis.
Protozoarios	<i>Rotavirus</i>	Enteritis.
	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Criptosporidiosis: Diarrea acuosa, cólicos abdominales.
	<i>Cyclospora cayetanensis</i>	A menudo asintomático: Diarrea, dolor abdominal.
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis: A menudo asintomática, disentería, fiebre, escalofríos.
Helmintos	<i>Giardia intestinalis</i>	Giardiasis: Diarrea, calambres, pérdida de peso.
	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Pocos o ningún síntoma: Sibilancias, tos, fiebre, enteritis, eosinofilia pulmonar.
	<i>Taenia solium/saginata</i>	Imperceptible a vaga molestia del tracto digestivo a emaciación con piel seca y diarrea.
	<i>Trichuris trichiura</i>	Imperceptible a vaga molestia del tracto digestivo a emaciación con piel seca y diarrea.
	<i>Anquilostomas</i>	Picazón, erupción, tos, anemia, deficiencia de proteínas.
	<i>Shistosomiasis spp.</i>	

4.1.2 Aspectos biológicos a considerar

En base a diferentes criterios de prevalencia, resistencia ambiental y normas sanitarias estudiadas de Chile y el extranjero, se seleccionó un grupo de patógenos para estudiar aspectos biológicos a considerar en el manejo del baño seco:

- *Blastocystis hominis*: Enteroparasitosis más frecuente en Chile. Puede producir síntomas en caso de inmunodepresión. Las causas del incremento en su prevalencia en los últimos años son desconocidas, pero se sugiere que el ciclo biológico del parásito comienza con la ingestión de sus quistes, vehiculizados en agua o frutas y verduras contaminadas, los cuales dan origen a formas vacuoladas que se localizan en el espesor de la capa superficial de la mucosa del colon para después formar nuevos quistes que constituyen el estadio infectante del B. Hominis [5].

En Chile se han encontrado tasas de prevalencia que varían entre 41,3% y 62,3%. La prevención de la blastocistosis debe basarse en acciones de educación sanitaria (tanto a nivel familiar, establecimientos de enseñanza, agrupaciones comunitarias, deportivas y otras instituciones) y adecuado saneamiento ambiental.

Es un protozoario unicelular anaerobio perteneciente al reino protista. [6], por lo que generar condiciones aeróbicas en las cámaras de tratamiento en un baño seco contribuirían al control en la propagación del microorganismo en el ambiente y en los usuarios.

- *Ascaris Lumbricoides*: Sus ovas son las más resistentes dentro de la familia de los helmintos y son mencionados en normas sanitarias como la del compost [7] o reglamento de manejo de lodos de aguas residuales [8]. Debido a su alta resistencia ambiental, la eliminación de este patógeno puede suponer que el resto de las poblaciones patógenas han sido destruidas. Una persona infectada

puede excretar miles de ovas todos los días [9], y las normas sanitarias aceptan niveles del orden de 1 ova cada 4 gramos de lodos para el caso de lodos de depuradoras [8].

Si las ovas son enterradas viables en un ambiente húmedo y oscuro, pueden sobrevivir hasta por 10 años [10], por lo que generar condiciones adversas con luminosidad y bajos niveles de humedad, se podría generar una barrera en la propagación de las ovas.

- *Taenia Solium* y *Saginata*: De los parásitos que tienen un ciclo de vida relacionado con animales característicos en zonas rurales, son de los que presentaron más prevalencia y debido a la gravedad de las enfermedades que puede producir un contagio cruzado entre especies.
- *Salmonella*: Está presente en normas sanitarias, como el reglamento de manejo de lodos de agua residuales, en la que se aceptan como máximo 3 [NMP/4g] de sólidos totales en base seca. Los microorganismos pueden entrar en vegetales a través de canales de agua en varias formas. Una vez dentro, los microorganismos son protegidos del stress ambiental. Bajo este concepto, una reducción del contacto entre los vegetales y el efluente maduro disminuye el riesgo de transmisión, además del control de células viables en el efluente sólido de BIS. El pH óptimo para el crecimiento de *Salmonella* es aproximadamente neutral, siendo valores > 9 y < 4 bactericidas. El crecimiento de *Salmonella* puede continuar a temperaturas tan bajas como $5,3^{\circ}\text{C}$, y temperaturas cerca de 45°C (temperaturas $>45^{\circ}\text{C}$ con bactericidas). Adicionalmente, la humedad disponible inhibe el crecimiento a valores inferiores a 0,94 en pH neutro, sin embargo, valores más altos de humedad son requeridos a medida que el pH se acerca a valores de mínimo crecimiento.
- *Coliformes totales* y *Escherichia Coli*: Son considerados como parámetros de calidad en normativas sanitarias como la norma chilena del compost y de

lodos [8]. La mayoría de los coliformes pueden encontrarse en la flora normal del tracto digestivo del hombre o animales, por lo cual son expulsados especialmente en las heces. Por esta razón, su presencia constante en la materia fecal, los coliformes son el grupo más ampliamente utilizado en la microbiología de alimentos como indicador de prácticas higiénicas inadecuadas.

5. Alternativas para el tratamiento de heces

A continuación, se presentará un resumen de las alternativas existentes para el tratamiento de heces en baños para su posterior comparación y primera selección, dentro de las cuales se encuentran:

- Lumbricultura
- Deshidratado
- Compostaje
- Incineración
- Biodigestión

5.1 Lumbricultura

Esta técnica se utiliza para reciclar residuos orgánicos biodegradables, se entiende por lumbricultura las diversas operaciones relacionadas con la cría y producción de lombrices epigeas y el tratamiento, por medio de éstas, de residuos orgánicos para su reciclaje en forma de abonos y proteínas. Este abono es de muy buena calidad y se denomina humus de lombriz o lumbricompuesto, el cual es un fertilizante orgánico con excelentes propiedades para la agricultura, la cual es una sustancia inodora

parecida a la borra de café que, en comparación con la urea es 5 veces superior en nitrógeno, fosforo, potasio y calcio.

La cría y reproducción de estos anélidos se efectúan en cunas apropiadas que pueden construirse de diferentes materiales. Puede ser manejado por niños y/o adultos indistintamente, no depara ningún tipo de enfermedad potencial. En ninguna de las etapas del compostaje o del vermicompostaje existen emanaciones de olor y se puede clasificar como una actividad base de cualquier granja autosustentable para el desarrollo orgánico de cualquier tipo de producción agro ganadera.

La lombriz utilizada es la *eisenia foetida* (lombriz roja californiana), la cual tiene un corto ciclo reproductivo (4 veces por año), elevada frecuencia de apareamiento, buena tolerancia al confinamiento pudiendo cohabitar entre 4000 a 50000 individuos por metro cuadrado.

En Chile la lumbricultura es un sistema que se a estado aplicando desde hace por lo menos 40 años, existen actualmente plantas de tratamientos que manejan los residuos de entre 300 a 1000 personas en distintas comunidades al largo del país, estas utilizan el novedoso sistema Tohá, desarrollado por el Chileno Dr. José Tohá, que consta de 4 fases; filtración, elevación, lombrifiltro y desinfección.

El sistema Tohá es una buena forma de ejemplificar los procesos que son necesarios para realizar un tratamiento mediante lumbricultura, el primero, la filtración es el proceso donde se eliminan todos los residuos no orgánicos que puede tener la mezcla, tales como plásticos, metales y otros.

En segunda instancia la planta de elevación cumple con el rol de elevar las aguas servidas hasta la cama de tratamiento o lombrifiltro. El cual el agua va filtrando a través de capas en las cuales van quedando atrapados los residuos orgánicos que contiene, estos sirven de alimento para las lombrices que posteriormente excretan en forma de humus.

El agua que filtra a través del lumbrifiltro pasa por una cuarta y última etapa de desinfección, se realiza mediante la lámpara de cuarzo que en su interior tienen un gas inerte, que emiten rayos UV durante cierto periodo a estanques donde encuentra almacenada el agua drenada, luego transcurrido el periodo de desinfección el agua puede ser utilizada para el regadío o descargada a un efluente sin provocar daños ambientales.

Las variables que deben ser consideradas para aplicar este método de saneamiento, son aquellas que afecten de alguna manera el funcionamiento del sistema, en especial para la tercera etapa en donde entra en acción el lumbrifiltro, se menciona dentro de estas características la humedad, la temperatura, la cantidad de alimento, etc.

Ventajas:

- Es recomendada para poblaciones pequeñas por la disponibilidad del área.
- Es un tratamiento económico en relación con otras tecnologías en las que se necesitan equipos costosos
- Puede ser desarrollada por las mismas personas, sin mano de obra extra

Desventajas:

- Se requiere de separación previa de los residuos
- Generación de olores
- Requiere mucho cuidado el mantener a las lombrices

5.2 Deshidratación y secado

Originalmente el uso de los secadores solares se ha empleado para la deshidratación de diferentes productos agrícolas como el café, tabaco, verduras y frutas, buscando una alternativa para evitar el uso de diferentes métodos de secado por medio de

hornos, usando combustibles fósiles. Esta alternativa del uso de secadores solares en la deshidratación de alimentos ha resultado eficiente y de gran aceptación en todo el mundo y ha sido objeto de muchas investigaciones como por ejemplo la realizada por la UNESCO, donde se realizó una guía completa para el uso adecuado del secador solar para para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes. La evolución del empleo de secadores solares en la deshidratación de alimentos ha sido a gran escala, empleando diferentes tipos de secado, variando los materiales de construcción, la forma del secador ya sea parabólico o plano, por convección artificial o natural.

El secado se refiere a reducir o separar total o parcialmente la humedad de un producto, buscando con esto obtener un producto el cual tenga unas características distintas a las iniciales, y se le pueda dar algún tipo de provecho. Esta técnica es una de las más antiguas que se han utilizado para conservar alimentos y productos agrícolas. El secado puede realizarse mediante tres tipos de procesos: El primero, mediante la evaporación y/o vaporización utilizando calor, se conocen técnicas como el secado térmico mediante aire caliente, radiación solar, etc. En segundo lugar, se encuentran procesos físico-químicos como la adsorción, congelación y ósmosis. Y, en tercer lugar, extraer el líquido utilizando medios como el filtrado, presión, vibración, centrifugación, etc.

Extraer un líquido desde un material sólido por medio del calor es el método más común que se realiza mediante la transferencia de líquido del interior del producto al exterior, a una fase de vapor saturada. Es un proceso donde se presenta básicamente mecanismos de transferencia de masa y energía. La transferencia de masa se encarga de transferir la humedad del interior del producto hasta la superficie y de allí al exterior del producto y la transferencia de energía del agente encargado de secar al producto. Adicionalmente, se debe tener en cuenta las propiedades del producto, ya que después del proceso de secado estas pueden variar considerablemente, como también son importantes al momento de elegir el proceso adecuado para obtener los resultados que

se buscan, ya que si la humedad es superficial, sólo será necesario un proceso de evaporación, en cambio sí en el producto ocurren fenómenos como la capilaridad, el flujo de moléculas y la difusión del vapor de agua, el secado estará ligado por el movimiento de la humedad.

Lo que se busca con el secado de algún producto es en parte hacer más fácil el manejo de este, reducir los costos de transporte, almacenamiento, conservación y manipulación del subproducto, hacer más eficiente el proceso, logrando un mayor desempeño en los equipos y maquinaria utilizados y de la misma forma disminuir el tamaño, reducir el consumo de energías convencionales, combustible y emisiones atmosféricas.

Ventajas:

- La utilización de energía solar por parte de estos equipos, logran que se puedan adaptar a lugar donde no tengan disponible energía eléctrica o abastecimiento de gas.
- La mezcla de heces secas y material secante, al ser rica en nitrógeno y otros nutrientes, pueden ser utilizadas como fertilizantes.
- La construcción de este tipo de sistemas puede ser autónomo.

Desventajas:

- Funcionamiento únicamente durante el día y en aquellos que esta soleado, ya que en estas condiciones se encuentra disponible la energía solar.
Por lo mismo, es un proceso que se puede desarrollar en mayor parte entre los meses de noviembre y marzo. Esto hace que el proceso sea intermitente y no haya seguridad al momento de hacer una calendarización del proceso.

5.3 Compostaje

El compostaje es un proceso de degradación y estabilización de sustancias orgánicas naturales que ocurren naturalmente debido a microorganismos como bacterias y

hongos, que se alimentan elementos orgánicos en descomposición, estos requieren de ciertas condiciones para poder sobrevivir, entre las cuales están la humedad, la temperatura, el oxígeno y una mezcla adecuada de C/N (carbono y nitrógeno).

El compostaje se puede dividir en según su temperatura en dos tipos, que es la separación más utilizada al hablar de compostaje, estos son el compostaje termofílico o alta temperatura y el compostaje mesofílico o a baja temperatura.

El compostaje mesofílico, es un proceso que se lleva a cabo en una larga cantidad de tiempo. Esto es lo que hacen la mayoría de los inodoros composta comerciales. La composta lenta generalmente se lleva a cabo a temperaturas menores a la del cuerpo humano, que es de 37°C o 98°F. Este tipo de composta elimina la mayoría de los organismos patógenos en un lapso de meses y eventualmente debería eliminar todos los patógenos que afectan al ser humano. La composta a baja temperatura produce un útil aditivo para la tierra que al menos resulta seguro para su uso en jardines ornamentales, para la horticultura y en huertos.

Por otro lado, existe además el compostaje termófilo o a alta temperatura, que ocurre cuando se la composta, por motivos biológicos, alcanza a temperaturas de entre 50° a 60° Celcius. Este tipo de composta involucra el cultivo de microorganismos amantes del calor, o termófilos, en el proceso de compostaje. Los microorganismos termófilos, como bacterias y hongos, pueden crear un ambiente en la composta que destruye a los organismos patógenos que existen en el llamado “humabono”, convirtiéndolo en un humus amigable y de buen olor, seguro para su uso en huertos.

Ventajas:

- Es un proceso natural, por lo que no necesita energía de ningún tipo, ya que esta se genera en el mismo proceso gracias al metabolismo de bacterias y otros microorganismos.

- Todos los elementos que se utilizan para construir a la compostera sirven únicamente con la función de facilitar y agilizar el proceso de compostaje, sin embargo, en un caso hipotético donde no existan recursos para obtener estos elementos, basta únicamente con contar con el espacio para realizarlo ya que se puede hacer un sistema de pilas.
- La materia sobrante puede ser utilizada como fertilizante para campos, jardines, huertas, etc.

Desventajas:

- Al ser un proceso poco común, su necesidad de cuidado y la dificultad de uso es mayor. El usuario debe entender por lo menos lo básico del proceso de compostaje, lo que requiere una capacitación inicial y material de apoyo para que el usuario pueda guiarse durante el proceso.
- El tiempo requerido por parte del usuario en atención al equipo es mayor en comparación a otros sistemas, ya que se debe estar preocupado de que el proceso se desarrolle en óptimas condiciones. Por otro lado el proceso toma por lo menos seis meses en realizarse y otros seis meses para curar el compost.
- La posibilidad que sobrevivan elementos patógenos al compostaje es de cuidado. A pesar de que la presencia de huevos de *Ascaris Lumbricoide* depende de si el dueño de las heces está infectado, el único método de contagio es ingiriéndolas. Es importante cuidar y seguir las medidas de precaución al momento de manipular el compost para evitar el contagio.

5.4 Biodigestión

La digestión anaeróbica o también llamada digestión anaerobia es un proceso en el cual a partir de la materia orgánica se genera una mezcla de gases con alto contenido de metano y un subproducto de lodos llamado bio abono. Es un proceso biológico complejo y de degradación, donde los sustratos ya sean residuos vegetales,

estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas se convierten en productos útiles. La digestión anaeróbica se caracteriza por realizarse en ausencia de oxígeno y es posible gracias a los microorganismos metanogénicos que desempeñan la función de enzimas respiratorias y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas.

Ventajas:

- Reduce el volumen de residuos que va a disposición final
- Puede generarse una planta a pequeña como a gran escala
- Producción de energía a partir de generación de biogás
- Lodo generado puede usarse como mejorador de suelo.
- Lodo generado se puede utilizar como abono

Desventajas:

- Tratamiento enfocado solo a la materia orgánica
- Requiere capacitación
- Requiere mantenimiento
- Se requiere un alto consumo de recurso acuífero.
- Dependiendo la magnitud del equipo es posible de ser necesario un amplio espacio.

5.5 Incineración

La incineración es la combustión completa de los residuos sólidos. La incineración se lleva a cabo en cámaras (generalmente hornos) mediante oxidación química en exceso de oxígeno. Mayoritariamente se usa este tratamiento para la destrucción de alguna información, eliminar residuos hospitalarios y para residuos. Los productos de la combustión son cenizas, gases, partículas tóxicas y algunas con efectos

cancerígenos, también energía calórica, que puede utilizarse para generar energía eléctrica. La principal característica de este tratamiento es que reduce el volumen de los residuos en un 90%. [11]

Para este proceso no se necesita un tratamiento especial de las heces, se requieren altas temperaturas, el producto final que se obtiene son cenizas que pueden ser utilizadas para la reutilización en suelo. El contenido de las cenizas es alto en potasio y fósforo. El volumen de cenizas producidas por persona al mes es bajo, es inodoro y libre de patógenos.

Actualmente se pueden encontrar baños incineradores eléctricos y a gas, en donde el sistema se encuentra integrado.

La energía necesaria para la incineración varía dependiendo el tratamiento primario, dado que, si se agregan elementos para secar como cenizas, tierra o cal, el proceso requerirá más energía, y además se genera una mayor cantidad de cenizas.

Ventajas:

- Es capaz de asegurar en un 100% de eliminación de patógenos.
- En los sistemas que ofrece el comercio su utilización es sumamente sencilla, no emite olores y el proceso no suele tardar más que un par de horas.
- En países del norte de Europa la utilización de estos sistemas de saneamiento, ha tenido un buen recibimiento por parte de los usuarios, ya que no deben manipular las heces ellos mismos y no genera un rechazo social o cultural.
- Las cenizas producidas por el equipo son reutilizables como mejorador de suelo.

Desventajas:

- La principal desventaja es el alto valor que tienen las unidades comerciales de incineración.

- Para poder hacer uso de este tipo de equipos, se requiere de una fuente de energía, comúnmente energía eléctrica, que elevan aún más los costos.
- A diferencia de los otros sistemas, el producto final tiene poco valor nutritivo para ser utilizado como fertilizante.

5.6 Resumen

Tabla 6: Cuadro resumen de características de alternativas

	Lumbricultura	Deshidratación	Compostaje	Biodigestor	Incineración
Producto obtenido	-Humus -Lombrices	Abono (rico en carbono, nitrógeno, fosforo y potasio)	Compost	Gas (metanol y co2)	Cenizas (potasio y fosforo)
Tiempo del proceso	3 meses	1-3 semanas, depende de la temperatura de trabajo	6 a 12 meses	Alta T° 15 días (100°C) T media-baja 2 a 6 meses (25-50°C)	1 hora
Dificultad de uso y mantención	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo
Costos operación	Bajo	Muy Bajo (solar) Medio (otra energía)	Bajo	Bajo	Gas (alto) Eléctrico (alto)

Costo Inversión	Medio	Medio	Medio-bajo	Medio Alto	Alto
Capacidad de saneamiento	Media Alta	Alta	Media Alta	Media alta	Muy alta
Ventajas	<p>No genera emisiones contaminantes.</p> <p>El producto restante puede ser utilizado.</p> <p>Está en funcionamiento todo el año.</p> <p>Reutilización de producto</p>	<p>Puede ser de bajo costo fijo.</p> <p>Producto de fácil manejo al ser de bajo peso.</p> <p>Reutilización de producto</p> <p>No genera emisiones contaminantes</p>	<p>No genera emisiones contaminantes</p> <p>No es un proceso del cual se deba estar pendiente.</p> <p>Funciona todo el año</p>	<p>Es capaz de generar combustible (útil para cocinar)</p> <p>Es posible utilizar energía solar para completar su proceso.</p>	<p>-El proceso es muy rápido.</p> <p>No necesita material secante.</p> <p>El producto es de escaso volumen</p> <p>Producto de fácil manejo debido a su bajo peso.</p>
Desventaja	<p>Existen variables ambientales de las cuales hay que tener precaución.</p> <p>Puede tener un rechazo desde la perspectiva cultural.</p> <p>Requiere una atención constante por parte del usuario</p>	<p>Si es solar solo se seca en condiciones de buena radiación solar.</p> <p>Dependiendo de su configuración, es posible que necesite un sistema de seguimiento.</p>	<p>Es un proceso al que no se puede seguir agregando materia orgánica una vez en marcha.</p> <p>Requiere un grado de conocimiento acerca del compostaje</p>	<p>Es un proceso demoroso.</p> <p>Se necesita agua para completar el proceso</p> <p>El producto sigue no estando completamente saneado.</p> <p>Aumenta el peso de los desperdicios.</p>	<p>Depende de una fuente de energía</p> <p>Dependiendo la energía a utilizar puede encarecer el sistema.</p> <p>-Debe tener una buena ventilación para olores y humo.</p>

6. Análisis y selección de alternativa

6.1 Metodología

Para la selección de alternativas se procede a ponderar cada una según los requerimientos exigidos para el sistema, asignando un puntaje a cada característica, de acuerdo a estos puntajes es que posteriormente se podrá tener una elección mas cercana a lo que se requiera. Se tiene en consideración que la capacidad de saneamiento no será evaluada, ya que todos los sistemas son capaces de lograr esta exigencia, si se evaluará el tiempo que tarda el tratamiento en cada alternativa. Los requerimientos exigidos a evaluar son los siguientes:

- Tiempo que demora el proceso de tratamiento:

Corresponde al tiempo que cada sistema puede tardarse en realizar un saneamiento completo de heces, de acuerdo a las condiciones exigidas. Para que un diseño sea mejor valorado en este requerimiento, se establece que tiene que tener un menor tiempo de tratamiento, con tal de optimizar el proceso. Un sistema que trabaja con una velocidad más alta obtendrá un puntaje más alto para la selección. El puntaje máximo es de 6 puntos para esta característica y la siguiente tabla muestra los valores para distintos intervalos de tiempo.

Tabla 7: puntaje ponderado según tiempo que dura el tratamiento

Tiempo (x)	$X < 2$ meses	$2 \text{ meses} < X < 4$ meses	$4 \text{ meses} < X < 6$ meses	$X > 6$ meses
------------	---------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------

Puntaje	6	4	2	1
---------	---	---	---	---

- Amigable con medio ambiente:

Este punto tiene relación con la emisión de gases contaminantes al medio ambiente y también evalúa si la alternativa a evaluar cumple con el objetivo de aportar con el ahorro del recurso hídrico. Para la selección de alternativa se dará un puntaje según la combinación siguiente:

Tabla 8: puntaje ponderado según aspectos medioambientales

Combinación	No existe emisión de gases contaminantes	Existe emisión de gases contaminantes	No existe emisión de gases contaminantes	Existe emisión de gases contaminantes
	Existe ahorro hídrico	No existe ahorro hídrico	Existe ahorro hídrico	No existe ahorro hídrico
Puntaje	6	2	2	0

- Disponibilidad:

La disponibilidad de un sistema es una medida que indica cuánto tiempo está disponible ese sistema operativo respecto de la duración total durante la que se hubiese deseado que funcionase. Típicamente se expresa en porcentaje.

Para evaluar este punto se considera como tiempo deseado, el que funcione durante todo el año, y sin considerar las fallas que pueda presentar el equipo y

mantenimientos programados. Por lo tanto, el mayor puntaje corresponderá al sistema que pueda operar sin interrupción y el menor puntaje al que por distintas condiciones internas o externas opere con interrupciones.

Tabla 9: puntaje ponderado según disponibilidad del sistema

Disponibilidad	100%, cuando se le requiera.	Interrumpida
Puntaje	3	1

- Costos operacionales:

Para este requerimiento se tiene en cuenta que el costo operacional debe ser el mínimo, esto quiere decir que el sistema debe minimizar sus gastos en insumos, materia prima y fuente de energía. De tal forma que el sistema mejor evaluado será aquel que pueda funcionar con energías renovables de forma sustentable, le seguirán aquellos que no tengan la necesidad de utilizar una fuente de energía pero sí insumos y finalmente los sistemas que necesariamente necesiten una fuente de energía no renovable (combustible, electricidad, etc.) para su funcionamiento. Por lo tanto, la evaluación será la siguiente:

Tabla 10: puntaje ponderado según costos operacionales del proceso

Funcionamiento	Requiere solo energía renovable.	No requiere energía. Requiere materias primas.	Depende de fuentes de energía no renovables.
Puntaje	4	2	0

6.2 Resultados

Requerimiento	Puntaje de alternativas				
	Lumbricultura	Deshidratación y secado	Compostaje	Biodigestión	Incineración
Tiempo	4	6	1	2	6
Medio ambiente	6	6	6	0	2
Disponibilidad	1	1	4	4	4
Costos operacionales	2	4	2	2	0
Total	13	17	13	8	12

7. Estado del arte deshidratadores solares

7.1 Energía Solar

La energía solar es un tipo de energía que se obtiene del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La radiación solar que llega a nuestro planeta ha sido aprovechada por el ser humano desde la antigüedad, mediante distintas tecnologías que han ido evolucionando hasta el día de hoy. En la actualidad, el calor y la luz del Sol, por medio de captadores puede ser transformado en energía térmica o energía eléctrica.

La energía solar pertenece a las denominadas energías renovables no convencionales (ERNC), que en la actualidad son una gran contribución para evitar el calentamiento global ya que pueden ser reemplazantes de los combustibles fósiles. Las diferentes tecnologías solares se pueden clasificar como pasivas o activas según la forma en que capturan, convierten y distribuyen la energía solar.

Las tecnologías activas incluyen la energía solar fotovoltaica, que produce electricidad a partir de la radiación solar mediante paneles fotovoltaicos, y la energía solar térmica que aprovecha la energía del sol mediante colectores solares sin concentración para producir calor para generar agua caliente o aire caliente, o con concentración para generar electricidad.

Las tecnologías pasivas son el conjunto de técnicas dirigidas al aprovechamiento de la energía solar de forma directa, sin transformarla en otro tipo de energía. Entre las tecnologías pasivas, se encuentran diferentes técnicas enmarcadas en la arquitectura bioclimática: la orientación de los edificios al sol, la selección de materiales con una masa térmica favorable o que tengan propiedades para la dispersión de luz, así como el diseño de espacios mediante ventilación natural.

7.1.1 Radiación Solar

La radiación solar es la energía radiante emitida por el sol en forma de energía electromagnética, la cual se extiende desde los rayos gamma (de longitud de onda de 10-10 cm. e inferiores) hasta las ondas de radio (de longitudes de onda de 105 cm y superiores). La mayoría de la radiación solar cae entre las longitudes de onda de 0,5 a 120 micrómetros, y la radiación de importancia para los usuarios de energía solar cae entre 0,15 y 3,0 micrómetros. Las longitudes de onda de la radiación visible están entre 400 y 750 nanómetros como se muestra en la siguiente imagen [12]:

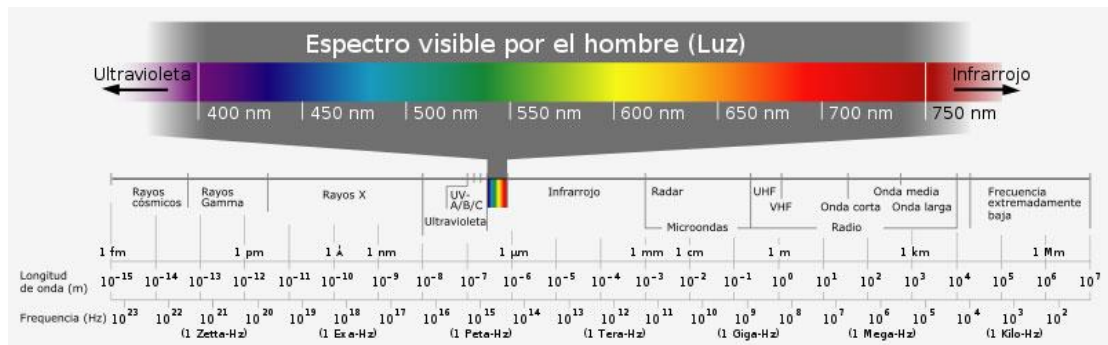


Ilustración 6: Espectro electromagnético

La radiación solar total que incide en una superficie terrestre es afectada por la atmosfera en su paso, lo que hace que se separe en tres componentes, siendo la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada:

Radiación directa: es la radiación que proviene del sol sin cambiar de dirección, y constituye el componente más grande de la radiación total.

Radiación difusa: es aquella que cambia de dirección por reflexión y dispersión, en un día nublado toda la radiación es difusa, sin embargo, en un día totalmente despejado siempre hay algo de radiación difusa además de la directa.

Radiación reflejada: es aquella que incide en el suelo (u otro cuerpo solido en la superficie terrestre) y luego incide en la superficie de captación. Depende de un coeficiente de reflexión llamado “albedo”, pero en muchos casos se puede considerar despreciable.

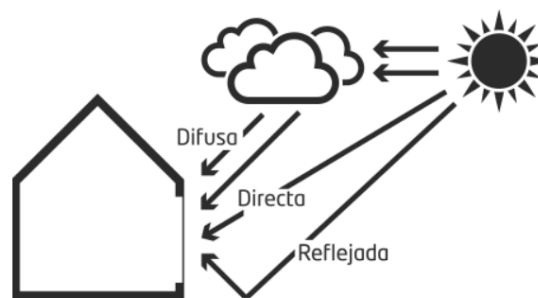


Ilustración 7: Tipos de radiaciones incidentes

Chile, al ser un país con una larga extensión, presenta microclimas en todo su largo y a su vez percibe una alta gama de valores de radiación solar dependiendo de la ubicación. A continuación, se presentan los valores de radiación captada durante un año promedio en las principales ciudades del País.

Tabla 11: Radiación Solar Global Sobre Superficie Horizontal, media anual. [13]

Ciudad	G [<i>kWh/m²</i>]
Arica	2341,66
Iquique	2067,39
Calama	2505,94
Antofagasta	2359,99
Copiapó	2174,34
La Serena	1813,99
Valparaíso	1431,34
Santiago	1843,44
San Fernando	1658,82
Concepción	1497,12
Temuco	1405,21
Puerto Montt	1212
Castro	1163,35
Coyhaique	1347,39
Punta Arenas	872,44

7.1.2 Ubicación Geográfica

La superficie del planeta está expuesta a la radiación proveniente del Sol. La tasa de irradiación depende en cada instante del ángulo que forman la normal a la superficie en el punto considerado y la dirección de incidencia de los rayos solares. Por supuesto, dada la lejanía del Sol respecto de nuestro planeta podemos suponer, con

muy buena aproximación, que los rayos del Sol inciden esencialmente paralelos sobre el planeta. No obstante, en cada punto del mismo, localmente considerado, la inclinación de la superficie respecto a dichos rayos depende de la latitud y de la hora del día para una cierta localización en longitud. Dicha inclinación puede definirse a través del ángulo que forman el vector normal a la superficie en dicho punto y el vector paralelo a la dirección de incidencia de la radiación solar.

7.1.2.1 Latitud

La latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado del planeta medidas con respecto al centro de la Tierra. Esta indica que tan separado está un punto del ecuador, se considera 0° en el ecuador y 90° en los polos, y se considera positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur. Se designa con la letra *L*.

7.1.2.2 Longitud

La longitud es la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y un meridiano considerado como base, medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto. El meridiano de referencia utilizado es el meridiano de Greenwich (meridiano 0°), la longitud es positiva hacia el este y negativa hacia el oeste, variando entre 0° y 180° .

Se puede observar el siguiente ejemplo, donde el punto “T” se ubica en una latitud “ φ ” y en una longitud “L”. Donde “G” representa el meridiano de Greenwich y el segmento I’ hasta I, corresponde a la línea del Ecuador.

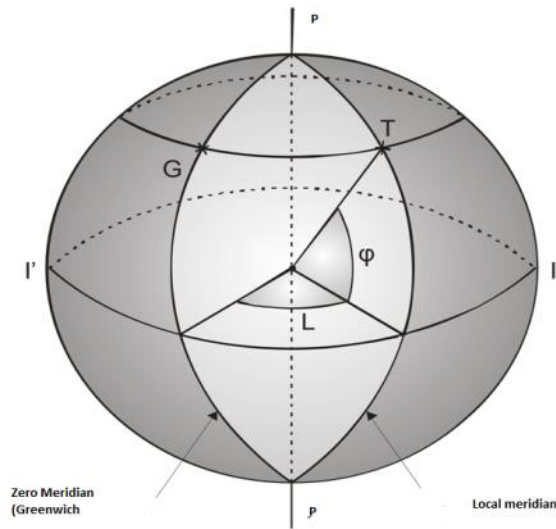


Ilustración 8: latitud ϕ y longitud L para una ubicación T

7.2 Instalaciones de energía solar térmica

El objetivo de los sistemas térmicos solares es captar la energía que proviene del sol para transformarla y transportarla de la manera más económica y eficaz posible. Las aplicaciones del aprovechamiento solar pueden ser directas, de tal forma que la generación de calor sea el objetivo final, o bien indirectas, utilizando este calor para obtener trabajo mecánico y finalmente realizar la conversión para generar electricidad.

Entre las tecnologías existentes, las que destacan por su grado de desarrollo: los sistemas de colectores cilindro parabólicos (CCP), los sistemas de receptor central (SRC) o sistemas de torre central (STC), y los discos parabólicos (DP) también llamados paraboloides de revolución. Estos sistemas pueden concentrar la radiación solar en un eje o también en un punto, dependiendo el tipo de concentrador, pudiendo alcanzar por ello mayores relaciones de concentración.

Estos sistemas aprovechan la radiación solar directa, y en algunos casos la radiación difusa proveniente del Sol. El elemento llamado “captador solar” permite absorber la

energía incidente el cual intercepta la energía radiante del Sol, la transforma en energía térmica y la transfiere.

Por lo tanto, un captador solar está constituido por un absorbedor que recoge la energía solar, una cubierta transparente y portador de energía térmica. El absorbedor es el elemento más importante del sistema captador, pues es el encargado de recibir y absorber primero la radiación solar y transformarla después en radiación térmica, de forma que por conducción esta energía se transfiera al fluido circulante o elemento interior. Por otro lado, la cubierta transparente o semitransparente evita en gran medida la emisión calorífica por convección desde al absorbedor al ambiente, así como lo protege de los agentes externos.

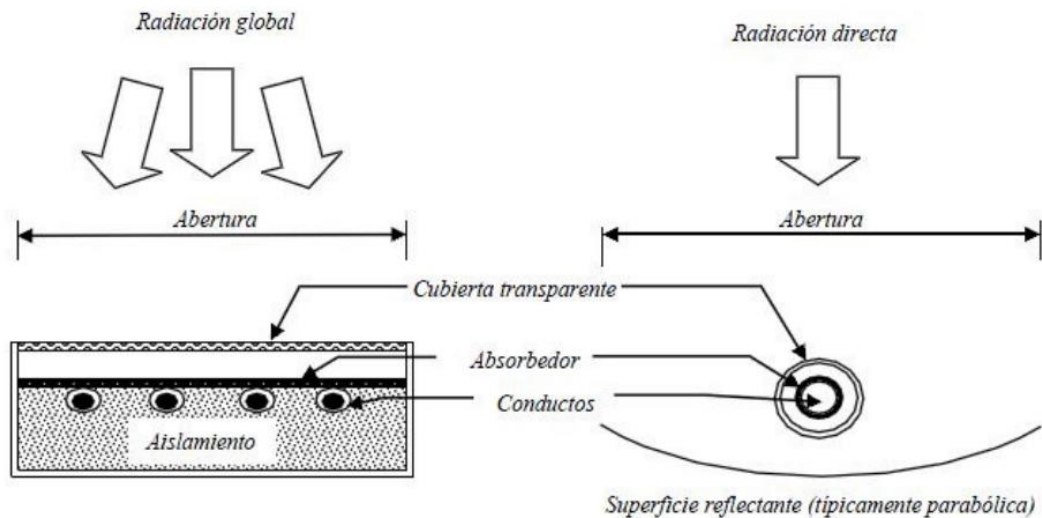


Ilustración 9: Esquema de colector y sus principales elementos

7.2.1 Clasificación de los colectores solares

Existen muchos tipos de colectores solares térmicos que, aunque en base tengan el mismo principio, tienen características diferentes. Por ello se pueden clasificar de muchas formas.

7.2.1.1 En función del aprovechamiento solar

La primera clasificación tiene que ver con que existen colectores que pueden funcionar con energía solar de forma global, que son en consecuencia “estacionarios”, y colectores que únicamente funcionan con radiación solar directa, y que necesitan un sistema de seguimiento del recorrido del Sol a lo largo del día. Estos últimos colectores denominados “seguidores” se subdividen en los que disponen de un único grado de libertad (absorbedores tubulares) y los que disponen de dos grados de libertad (absorbedores puntuales).

7.2.1.2 En función de la temperatura del fluido o elemento absorbente

Esta clasificación tiene en cuenta las temperaturas a las que puede llegar el fluido transportador o el elemento absorbente, y con esto las posibles aplicaciones que pueden aprovecharse de dichas temperaturas.

- Temperatura baja (30°C – 100°C): Este rango se consigue con colectores planos. Entre sus aplicaciones están las de calentamiento de aguas sanitarias y de piscinas, calefacción, secado, desalinización y destilación. Estos sistemas son en general híbridos ya que casi siempre son usados con apoyo de otros tipos de energía como la eléctrica, dado que la energía solar no siempre está disponible, lo que puede ocasionar una interrupción en el servicio.
- Temperatura media (100°C – 400°C): Se alcanzan con concentradores lineales o esféricos y se usan en procesos industriales, así como en refrigeración, en procesos químicos y de desalinización.
- Temperatura alta (400°C – 3000°C): Estas altas temperaturas se alcanzan gracias a los concentradores puntuales como los de discos parabólicos y centrales de torre. Se utilizan en centrales solares fototérmicas, fotovoltaicas y

fotoquímicas, también en hornos solares para tratamientos térmicos e investigación de materiales.

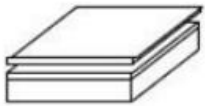

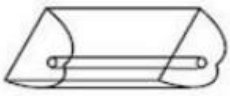



7.2.1.3 En función de la razón de concentración

Para esta clasificación, hay que introducir un nuevo parámetro, el factor o razón de concentración, denotado por la letra “C”. Este concepto tiene que ver con los dos elementos básicos dentro del colector, el concentrador y el receptor. El primero constituye el sistema óptico, y es la parte del colector que dirige la radiación sobre el receptor. Éste es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y se convierte en otro tipo de energía. Por tanto, la razón de concentración superficial se define como el cociente del área de apertura del concentrador entre el área de absorción del receptor [14]:

$$C = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de absorción}}$$

A continuación, se presenta la tabla que resume la clasificación de los tipos de concentradores solares.

Tabla 12: Clasificación de los tipos de concentradores solares

		Nombre	Croquis	Razón de concentración n "C"	Rango Temperatura alcanzada [C°]	
Estacionario	Absorbedor plano	Capataador plano de agua/aire		$C \leq 1$	$30 < T^a < 250$	
		Tubos de vacío		$C \leq 1$	$50 < T^a < 200$	
Seguidores	Seguimiento a un eje	Absorbedores tubulares	Colector Parabólico Compuesto CPC		$1 < C < 15$	$70 < T^a < 300$
		Colector Cilíndrico Parabólico CCP		$15 < C < 40$	$70 < T^a < 350$	
	Seguimiento a dos ejes	Absorbedores puntuales	Disco Parabólico		$100 < C < 1000$	$70 < T^a < 1500$
			Torre Central		$100 < C < 1500$	$150 < T^a < 1500$

7.3 Conceptos básicos de aire atmosférico

Se denomina aire atmosférico a la mezcla de gases incolora, inodora e insípida que rodea la tierra y que permanecen dentro de la atmosfera terrestre gracias a la fuerza de gravedad. Los principales gases que lo componen son: nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (0-7%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles como kriptón y argón.

La atmósfera terrestre se divide en cuatro capas que se clasifican según la altitud, temperatura y composición del aire: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. A mayor altitud disminuyen la presión y el peso del aire.

Existe el aire con contenido de humedad (en su mayoría) y sin contenido de humedad o aire seco. Este último en condiciones ideales se comporta bajo las leyes de los gases ideales, mientras que el aire con vapor de agua no. Por lo general se dice que el aire contiene humedad, y cabe destacar que el aire con el vapor de agua, son independientes uno del otro, y que no responden de la misma manera a los cambios de condiciones, especialmente a los cambios de temperatura.

7.3.1 Propiedades de aire atmosférico

Para procesos donde se utiliza aire atmosférico como fluido de trabajo, es de suma importancia determinar las propiedades termodinámicas de este, cosa de definir su estado y así garantizar que la operación desarrollada por el fluido de trabajo se realice satisfactoriamente. A continuación, se darán a conocer las principales propiedades del aire:

Temperatura:

Existen dos formas de medir la temperatura del aire; temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo.

- Temperatura de bulbo seco: es la temperatura medida con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco.
- Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura medida por un termómetro de mercurio convencional que tiene el bulbo envuelto en un paño de algodón empapado de agua. Cuando se proporciona una corriente de aire, el agua se evapora relativamente rápido dependiendo de la humedad relativa del ambiente, enfriándose más cuanto menor sea ésta, debido al calor latente de evaporación del agua.

Presión:

La presión es la magnitud que relaciona la fuerza con la superficie sobre la que actúa. Muchas veces la presión se mide por encima de la presión atmosférica, lo que es llamado presión absoluta y corresponde a la suma de la presión atmosférica y la presión manométrica.

La presión atmosférica es la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire sobre la superficie terrestre. La presión atmosférica en un punto coincide numéricamente con el peso de una columna estática de aire de sección recta unitaria que se extiende desde ese punto hasta el límite superior de la atmósfera.

Humedad relativa:

Es la razón entre la masa de agua que contiene el aire atmosférico y la masa de agua del aire saturado. Es decir, es la razón entre el agua existente en el aire y la máxima que podría existir sin condensar.

Una definición más técnica para la humedad relativa según la ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), sería la relación de la fracción mol del vapor de agua presente en el aire, con la fracción mol del vapor de agua presente en el aire saturado, a la misma temperatura y presión. A menor valor de humedad relativa mayor capacidad del aire para retener humedad y a mayor humedad relativa menor capacidad para retener humedad.

Humedad absoluta:

Es la razón entre la masa de agua que contiene el aire atmosférico y la masa de aire seco. La humedad relativa está basada en la humedad absoluta, bajo las condiciones establecidas; es decir, la humedad relativa es una comparación con la humedad absoluta a la misma temperatura, si el vapor de agua está saturado.

Punto de Rocío:

Es la temperatura a la que se empieza a condensar el vapor de agua cuando se enfría el aire atmosférico a una presión constante. Durante este proceso la humedad

específica permanece constante mientras que la relativa aumenta. También es el punto de 100% de humedad. La humedad relativa de una muestra de aire, puede determinarse por su punto de rocío.

Entalpía:

En cada uno de los procesos donde se trabaja con aire como fluido de trabajo es necesario saber cuál será cantidad de energía que el sistema intercambia con su entorno. Es aquí donde aparece la Entalpía, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico. La entalpía no es una propiedad medible a través de instrumentos, sino que se deriva del conocimiento de otras propiedades.

Densidad:

La densidad es una magnitud escalar que representa la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que este ocupa.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Volumen específico

El volumen específico es el volumen ocupado por unidad de masa de una sustancia. Es el inverso de la densidad.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

7.4 Teoría del secado

El secado es una operación que consiste en reducir la humedad de un producto cualquiera, de forma que el producto final presenta unas características muy diferentes a las de la inicial. Esta operación puede hacerse mediante:

- Evaporación y vaporización con ayuda de calor (secado térmico mediante aire caliente, radiación solar, etc.).
- Procesos fisicoquímicos (liofilización, ósmosis, adsorción, congelación, etc).
- Por extracción de agua a través de medios mecánicos (presión, vibración, filtrado, centrifugación, etc.).

El secado térmico, sistema más habitual y utilizado de secado de subproductos, es un proceso simultáneo de transferencia de masa y energía en el que se produce básicamente lo que aparece en la siguiente imagen:

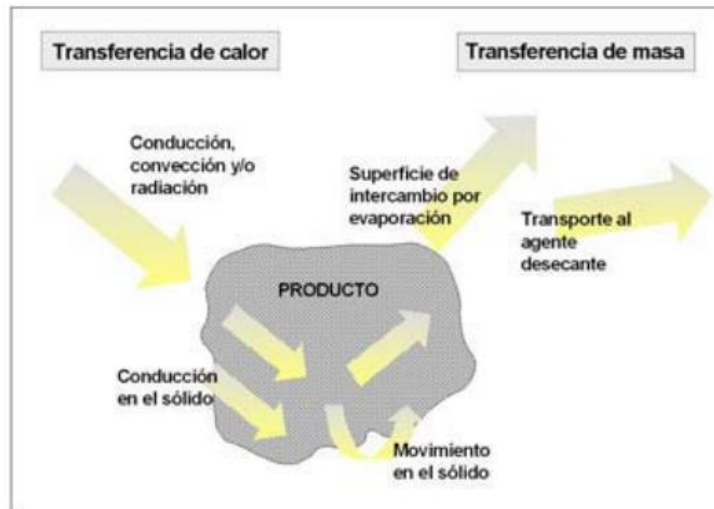


Ilustración 10: Proceso de secado en un producto

7.4.1 Contenido de humedad

El factor de mayor influencia en la cinética de secado es el contenido de humedad del material. Existen diferentes métodos para medir el contenido de humedad de un producto.

Los métodos indirectos utilizan la dependencia de una propiedad del producto (p.ej. conductividad eléctrica) con el contenido de humedad, consiguiendo una medición rápida pero que requiere de un equipo muy especializado.

La determinación directa del contenido de humedad implica medir la masa de producto y la masa seca correspondiente al eliminar el agua evaporable contenida en él, aplicando calor a una temperatura generalmente de 104 [°C] hasta llegar a un peso constante de la muestra. Este método, aunque es el más utilizado, presenta como principal inconveniente el que al evaporar el agua se pueden eliminar, al mismo tiempo, otras sustancias del producto (volátiles) lo cual puede suponer errores en la obtención de dicha variable.

La cantidad de humedad presente en un material puede ser expresada en base húmeda o en base seca, e indicada como decimal o porcentaje. El contenido de humedad en base húmeda, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material sin secar, viene dado por la ecuación 7.1. De igual manera, el contenido de humedad en base seca, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material seco, se indica en la expresión 7.2. [15]

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_o} = \frac{W_o - W_d}{W_o} \quad (7.4.1.1)$$

$$M_{db} = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (7.4.1.2)$$

Donde:

M_{wb} : es la humedad en base húmeda [kg agua / kg producto húmedo]

M_{db} : es la humedad en base seca [kg agua / kg producto seco]

W_o : es el peso inicial de material sin secar [kg],

W_w : es la cantidad de agua en el producto húmedo [kg]

W_d : es el peso de la materia seca en el producto [kg].

Habitualmente en ingeniería y, más concretamente, en ensayos de secado, donde el producto se va pesando de forma regular disponiendo de un registro de pérdida de peso, el contenido en humedad instantáneo para cualquier tiempo t , en base húmeda o seca, se obtiene respectivamente mediante las expresiones 7.4.1.1 y 7.4.1.2. [15]

$$M_{t_wb} = 1 - \left[\frac{(1 - M_{owb}) \cdot W_o}{W_t} \right] \quad (7.4.1.3)$$

$$M_{t_db} = 1 - \left[\frac{(1 - M_{odb}) \cdot W_o}{W_t} \right] \quad (7.4.1.4)$$

Donde:

M_o : es el contenido en humedad inicial en base húmeda o seca.

W_t : el peso del material en el tiempo t [kg].

W_o : es el peso inicial de material sin secar [kg]

M_t : contenido en humedad instantáneo para cualquier tiempo t , en base húmeda o seca.

7.4.2 Humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio es la humedad que existe cuando la presión de vapor del agua en el alimento está en equilibrio con la presión parcial del vapor de agua en el aire. Si el aire se satura totalmente durante el secado, entonces el equilibrio se establece con la presión de vapor del agua en el aire ya que esta presión es igual a la presión parcial del vapor de agua bajo esas condiciones.

La humedad de equilibrio se expresa en base seca. En unidades del sistema internacional sería [kg agua / kg sólido seco]

7.4.3 Tipos de humedad en sólidos.

Humedad libre: Es la humedad del sólido; que es la humedad que está en exceso con relación a la humedad de equilibrio. Esta la humedad se puede evaporar y retirar del sólido, depende de la humedad relativa de la corriente gaseosa.

Humedad ligada: Humedad que ejerce una presión de vapor de equilibrio menor a la del líquido puro.

Cuando la presión de vapor del sólido es menor a la del líquido puro a la misma temperatura. El agua puede estar unida Química o físicamente al sólido.

Este tipo de humedad se da por:

- El agua retenida en poros, capilares finos que no tienen fácil acceso a la superficie del sólido.
- El agua unida molecularmente a la sustancia como en los hidratos.
- El agua puede contener una alta concentración del sólido disuelto.

Humedad no ligada: Humedad que ejerce una presión de equilibrio igual a la del líquido puro.

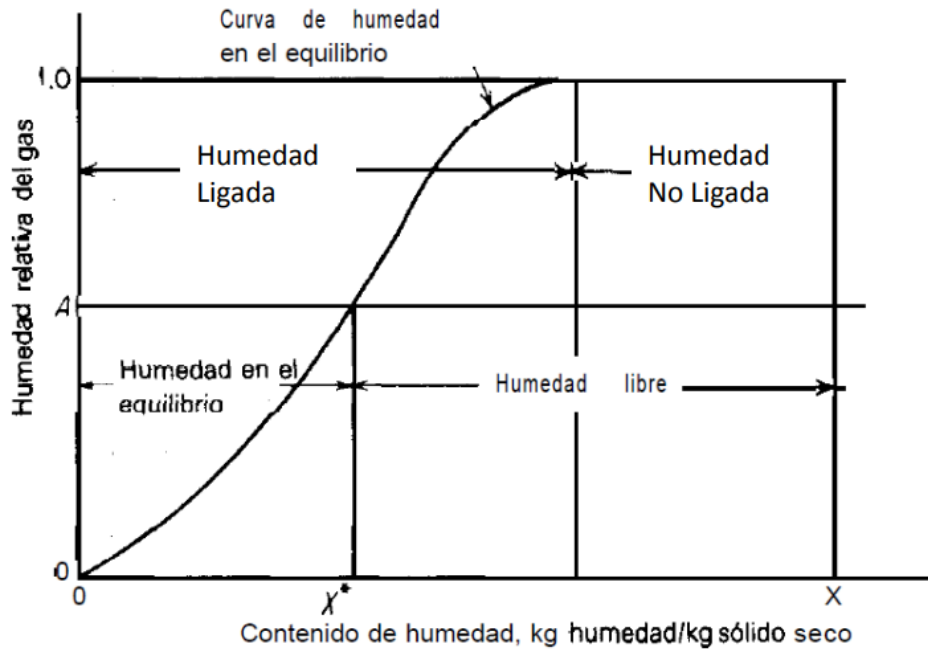


Ilustración 11: Curva de humedad en equilibrio

7.4.4 Calor latente de vaporización.

El requerimiento térmico para secar un producto se denomina calor latente de vaporización, L_w , y representa la cantidad de energía que tiene que absorber el producto para vaporizar su humedad, esto es, la energía necesaria para evaporar 1 [kg] de agua. En el agua libre, este valor depende exclusivamente de la temperatura y es del orden de los 2450 [kJ/kg] a 20 [°C]. Su valor en función de la temperatura se puede determinar mediante la expresión [16]:

$$L_w = \frac{R}{M_w} \cdot (p_{s1} - p_{s2} \cdot (T + 273.15)) \quad (7.4.4.1)$$

Donde

L_w : es el calor latente de vaporización del agua pura en [kJ/kg]

R : es la constante de los gases (8314 [J/kmol K])

M_w : es el peso molecular del agua (18,01 [kg/kmol])

p_{s1} : constante de la ecuación con valor de 6547,1

p_{s2} : constante de la ecuación con valor 4,23

T : la temperatura en [°C].

Si el agua no está libre, el calor latente de vaporización es mayor y los factores de los que depende son el tipo de producto, su humedad y la temperatura. De esta manera, conforme aumenta el contenido de humedad y la temperatura, menor es el calor latente de vaporización necesario.

Por otro lado, si el ambiente en el que se encuentra el producto tiene una humedad relativa mayor que la actividad de agua que le corresponde a su contenido de humedad, éste absorbe humedad. Por lo tanto, para secar el material no es suficiente con suministrar calor, sino que es necesario que la humedad relativa del ambiente en el que se encuentra sea lo suficientemente baja.

7.4.5 Curvas de secado de un producto

- **Curva de secado**

Este tipo de curvas muestran el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado.

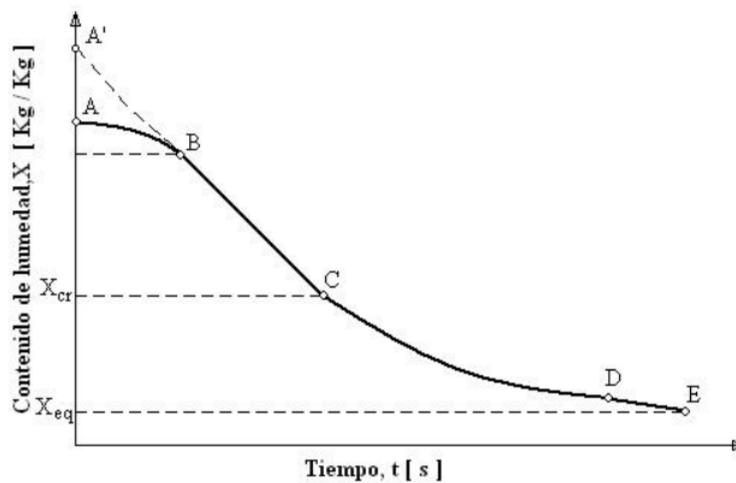


Ilustración 12: Curva de tiempo de secado

- **Curva de velocidad de secado**

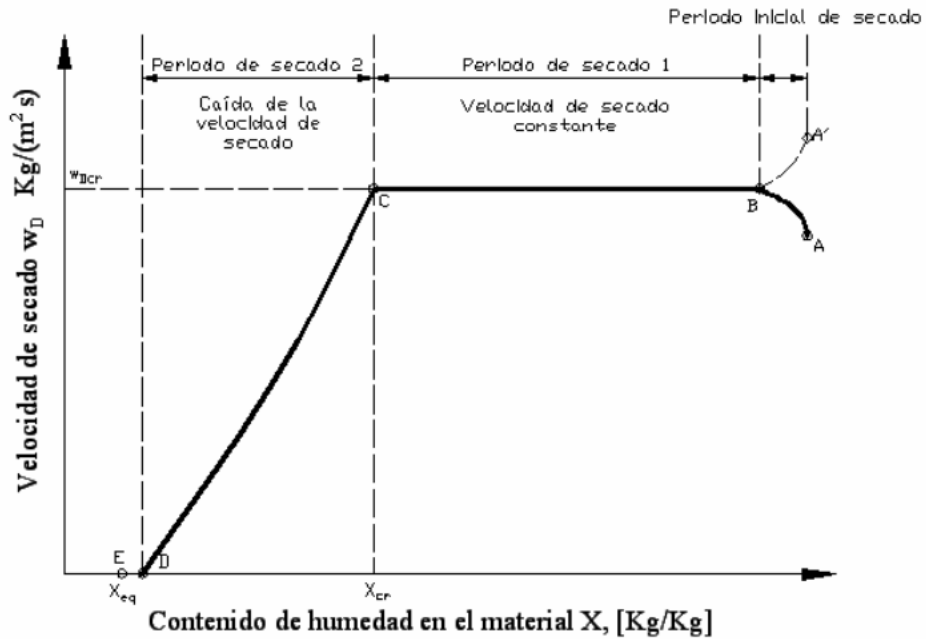


Ilustración 13: Curva de velocidad de secado

El proceso de secado se caracteriza por tres fases:

1) Primera Fase: Periodo de velocidad de secado creciente (A-B)

Es una etapa de calentamiento inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas.

2) Segunda Fase: Periodo de velocidad de secado constante (B-C)

En esta etapa el secado tiene lugar sólo en la superficie, produciéndose exclusivamente la evaporación de la humedad superficial. La extracción de humedad en este periodo depende principalmente de las condiciones del aire circundante y prácticamente es independiente de la naturaleza del producto. El movimiento del agua en el material es lo suficientemente rápido como para mantener las condiciones de

saturación en la superficie, de manera que durante todo el intervalo el producto se encuentra saturado de humedad a una temperatura prácticamente constante y aproximadamente igual a la temperatura de bulbo húmedo. El proceso es similar a la evaporación de un líquido. (En los materiales no higroscópicos todo el proceso de secado tiene lugar en el régimen de secado constante).

3) Tercera Fase: Periodo de velocidad de secado decreciente. (C-D)

Comienza al finalizar el periodo constante (contenido de humedad crítico del producto). La resistencia interna del material se hace más importante, dificultando el paso de humedad; ya no existen condiciones de saturación en la superficie y se produce la eliminación de la humedad interna. Este periodo depende fundamentalmente de la difusión de humedad del interior del producto hacia la superficie, así como de la evaporación superficial. A su vez, está dividido en dos estados [17], un primer periodo decreciente, en el que tiene lugar el secado de la superficie no saturada, y un segundo periodo decreciente en el que la difusión de humedad a la superficie se hace más lenta y es el factor determinante. En general, la duración de estos regímenes depende del contenido de humedad inicial del material.

Los materiales no higroscópicos se caracterizan por tener la humedad ligeramente retenida en su interior, de forma que se considera “desligada” del producto y, por tanto, es posible secarlos hasta valores de contenido de humedad iguales a cero. Por otro lado, en los materiales higroscópicos, la humedad contenida está usualmente “atrapada” en pequeños capilares cerrados, siendo imposible llegar hasta valores de humedad iguales a cero y, por tanto, siempre existe un contenido de humedad residual.

7.5 Propiedades psicrométricas

Los procesos de secado dependen en gran medida de los cambios que se producen en las propiedades del agente desecante, generalmente aire húmedo (mezcla de aire seco

y vapor de agua), cuya información se encuentra organizada en las cartas psicrométricas.

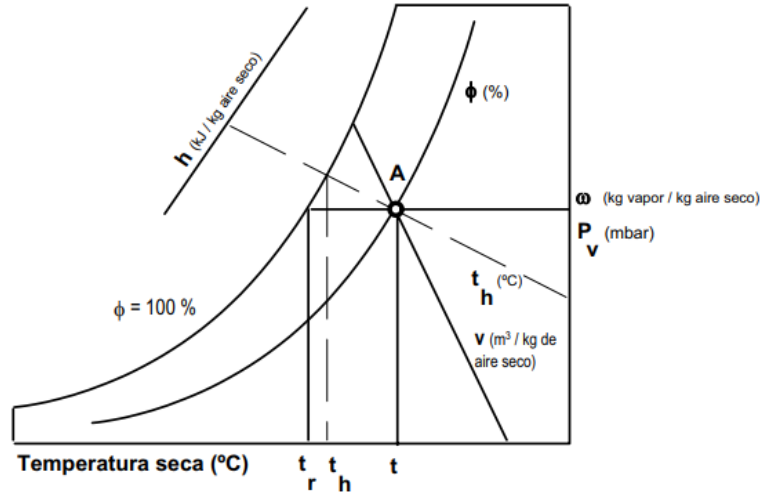


Ilustración 14: Carta Psicrométrica

7.5.1 Variables

- 1) Temperatura de bulbo seco: Es la temperatura medida con un termómetro común.
- 2) Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura que resulta de la evaporación del agua.
- 3) Temperatura de punto de rocío: es la temperatura de saturación, a la cual se produce la condensación del vapor de agua.
- 3) Humedad específica: es el peso real de vapor de agua en el aire, se expresa en [kg de agua / kg de aire seco].
- 4) Humedad relativa: es la relación del vapor de agua real en el aire, comparado a la máxima cantidad que estaría presente a la misma temperatura, se expresa en un porcentaje [%]
- 5) Volumen específico: es el número de metros cúbicos ocupados por una libra de la mezcla de aire y vapor de agua.

6) Calor sensible: es la cantidad de calor seco, expresado en [kJ / kg de aire], se refleja por la temperatura de bulbo seco.

7) Calor latente: es el calor requerido para evaporar la humedad que contiene una cantidad específica de aire. Esta evaporación ocurre a la temperatura de bulbo húmedo, se expresa en [kJ / kg de aire].

8) Calor total (Entalpía): es el contenido de calor total de la mezcla de aire y vapor de agua, es decir la suma de calor sensible y calor latente expresado en [kJ / kg de aire].

7.5.2 Evoluciones típicas del aire en un proceso de secado.

Como es sabido, el objetivo de un proceso de secado es la extracción de humedad de un producto, que puede realizarse por diferentes técnicas, siendo las más usuales el contacto natural o forzado del aire (precalentado o a temperatura ambiente) con dicho producto.

Este flujo de aire que pasa sobre el material a secar produce la transferencia de calor del aire al producto que da lugar a la vaporización de la humedad del producto al aire (proceso simultáneo de transferencia de masa y energía) y el consecuente incremento de su humedad relativa con una disminución de la temperatura seca y una constante temperatura de bulbo húmedo.

La utilización de aire precalentado supone una optimización en un proceso de secado [17], mejorando el aumento de la temperatura la capacidad de arrastre de humedad. En la siguiente figura se muestra, de forma esquemática, la ventaja de aumentar la temperatura seca del aire.

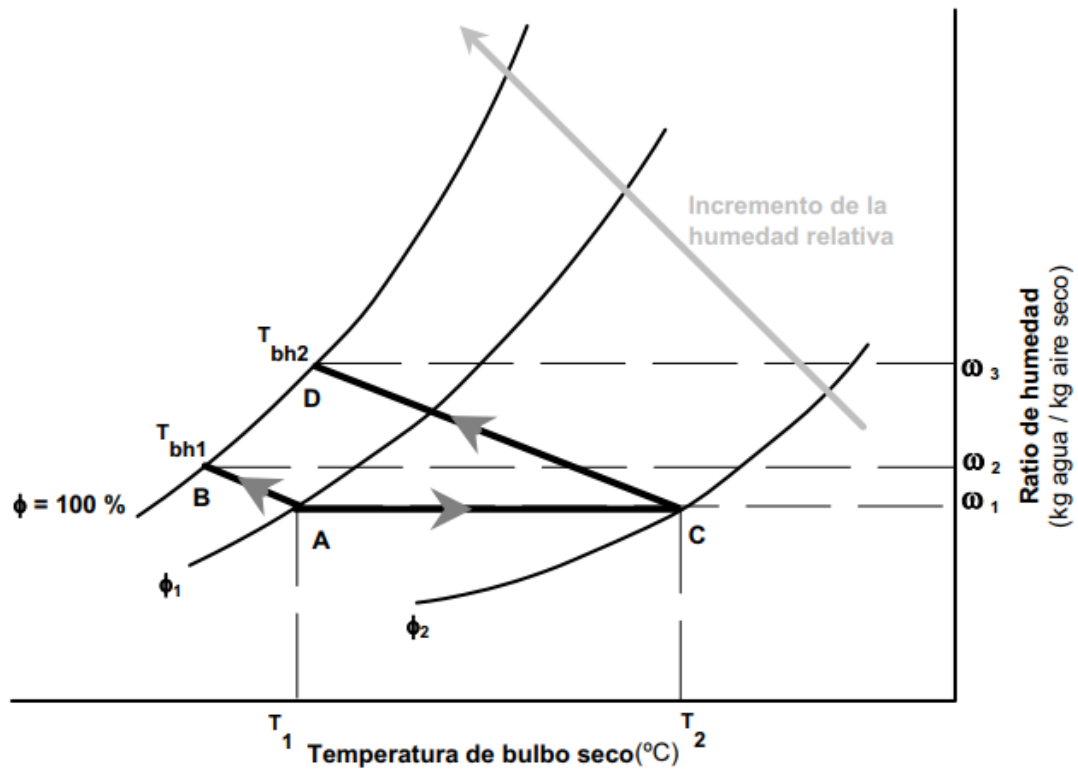


Ilustración 15: Evolución del aire en los procesos de secado

Así, se considera un aire ambiente no saturado a temperatura T_1 , humedad relativa ϕ_1 , temperatura de bulbo húmedo T_{bh1} , y humedad absoluta ω_1 (sección A en la ilustración anterior). Si el aire no es precalentado, éste seguirá la línea de enfriamiento adiabática T_{h1} (AB en la ilustración anterior) y si idealmente el proceso continuara hasta la saturación, le correspondería una humedad absoluta ω_2 , lo que implicaría una extracción máxima de humedad dada por $(\omega_2 - \omega_1)$. Sin embargo, si el aire ambiente es precalentado (antes de usarse para el secado) a humedad absoluta constante ω_1 , hasta una temperatura seca T_2 , con una humedad relativa ϕ_2 , (línea AC en la ilustración anterior), el proceso de secado se correspondería con la nueva línea de enfriamiento adiabática T_{h2} (línea CD en ilustración anterior) que en condiciones de saturación le correspondería una humedad absoluta ω_3 . En este caso, el máximo valor de extracción de humedad se correspondería con $(\omega_3 - \omega_1)$.

Se aprecia, por tanto, que un aumento relativamente pequeño de la temperatura del aire incrementa considerablemente la capacidad de arrastre de humedad de éste. De manera aproximada, para el rango de temperaturas en el que tienen lugar los procesos de secado de productos agrícolas, cada [°C] de incremento de la temperatura seca del aire provoca un aumento de su capacidad de arrastre de $3,6 \cdot 10^{-4}$ [kg agua / kg aire húmedo no saturado].

Para condiciones ambiente habituales, por ejemplo, 20 [°C] y 59 % de humedad relativa el cambio a aire precalentado a 35 [°C] con 25 % de humedad relativa, incrementa en más de tres veces la capacidad de arrastre del aire. De esta forma, mediante el uso de captadores solares de aire en los sistemas de secado solar, se consigue aumentar la capacidad desecante del aire, mejorando la eficiencia del proceso.

La capacidad deshidratante del aire depende principalmente de su humedad relativa, la cual es a su vez función de su temperatura. De esta forma, se pueden considerar tres posibles evoluciones del aire en el proceso de secado [15]:

1) Evolución adiabática:

El sistema evoluciona sin intercambio de energía calorífica con el medio exterior. El producto a secar cede agua al aire, con lo que, desciende la temperatura de ambos hasta que se alcanza el equilibrio correspondiente a la saturación adiabática y la humedad relativa alcanza el valor del 100 %. Conseguido este límite es imposible extraer más agua del producto.

2) Evolución del aire en un proceso de secado sin aporte calorífico exterior:

Consiste en hacer pasar una corriente de aire, a temperatura ambiente y no saturado a través de un producto, sin recibir aporte de energía calorífica exterior. De esta forma el aire en contacto con el producto extrae de este parte de su humedad, con lo que la temperatura inicial de ambos desciende. A lo largo de su recorrido, el aire aumenta su humedad relativa hasta alcanzar la saturación y, además, si el recorrido es

suficientemente largo y el caudal lo permite, la temperatura final será próxima a la de bulbo húmedo.

En un proceso eficiente y dado que la circulación forzada conlleva un coste, es necesario determinar el caudal de aire necesario para secar el producto en el menor tiempo posible. Aunque no existen fórmulas matemáticas exactas para obtener a priori este caudal, va a depender fundamentalmente de la naturaleza del producto y del tipo de secadero.

Sin embargo, existe la posibilidad de conocer si el proceso de secado se está efectuando en las condiciones adecuadas, mediante la medida de la temperatura a la salida del secadero y en puntos intermedios de éste. Así, si en los puntos intermedios el aire tiene una temperatura próxima a la de saturación adiabática correspondiente a la temperatura del aire seco a la entrada, el caudal es insuficiente.

Por el contrario, si la temperatura disminuye progresivamente a lo largo del secadero, pero a la salida no experimenta un descenso apreciable, respecto a la entrada, el caudal de aire está dimensionado en exceso.

Por último, si la temperatura se mantiene constante a lo largo del proceso, se puede asegurar que el aire no sirve para secar el producto ya que se encuentra en equilibrio con él, debiendo aumentar la capacidad desecante del aire (aumentando su temperatura, conducirlo a través de un material higroscópico, someter el producto a un proceso de vacío, etc.).

3) Proceso de secado con aporte energético directo:

Se utiliza para mejorar la capacidad desecante del aire, que como se ha indicado, aumenta con su temperatura. Este sistema combinado con el anterior es el sistema más habitual de secado (convección forzada y aporte de energía calorífica).

7.5.3 Tiempo de secado

El tiempo de secado depende del material, esto define las características que tendrá la curva de secado. El tiempo de secado debe ser determinado separadamente para el primer y segundo periodo de secado.

La siguiente ecuación define la velocidad de secado, esta puede reacomodarse para obtener el tiempo de secado.

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{dX}{w_d} \quad (7.5.3.1)$$

Donde x_1 y x_2 son el contenido de humedad desde el tiempo cero al tiempo t , respectivamente.

- Periodo constante:

El secado en este periodo es constante y por lo tanto la ecuación 7.5.3.1 obtenemos el tiempo para la primera parte del periodo de secado.

$$t_1 = \frac{m_s}{A \cdot w_1} \cdot (x_1 - x_{cr}) \quad (7.5.3.2)$$

Se observa que $x_{cr} = x_2$, esto es porque es el contenido de humedad al final del primer periodo. En este periodo de secado influyen la velocidad de secado, que dependen de los coeficientes de transferencia de calor y masa entre el agente de secado y la superficie a secar.

- Periodo de caída de secado:

Se considera el caso de caída lineal, la forma de la velocidad de la curva depende del tipo de cuerpo, la velocidad de secado en el primer periodo y el contenido crítico de humedad.

$$t_2 = \frac{m_s}{A} \cdot \int_{x_2}^{x_{cr}} \frac{dX}{w_2} \quad (7.5.3.3)$$

Donde x_2 es el contenido final de humedad en el material.

Si se observa el gráfico anterior de velocidad de secado, se observa que existe una dependencia de $w_2 = f(x)$ que es lineal, y se puede escribir de la siguiente forma.

$$w_2 = aX + b$$

Sustituyéndola en la ecuación 7.5.3.3 se obtiene:

$$t_2 = \frac{m_s}{A} \cdot \int_{x_2}^{x_{cr}} \frac{dX}{aX + b} \quad (7.5.3.4)$$

Realizando la integración:

$$t_2 = \frac{m_s}{a \cdot A} \cdot \ln \left(\frac{aX_{cr} + b}{aX_2 + b} \right) \quad (7.5.3.5)$$

Los coeficientes pueden ser obtenidos de la siguiente manera:

$$a = \frac{w_1 - w_2}{X_{cr} - X_2} \quad (7.5.3.6)$$

$$w_2 = aX + b \quad (7.5.3.7)$$

Sustituyendo estos coeficientes en (a y b) en la ecuación 7.5.3.5, se obtiene:

$$t_2 = \frac{m_s}{A} \cdot \frac{X_{cr} - X_2}{w_1 - w_2} \cdot \ln \left(\frac{w_1}{w_2} \right) \quad (7.5.3.8)$$

Finalmente, el tiempo total del proceso es la suma de los tiempos tomados en los dos periodos.

Para obtener estos tiempos en ambos periodos es necesario tomar datos experimentales y obtener las curvas de secado.

8. Diseño de prototipo

8.1 Factores que afectan la aceptabilidad por parte de los usuarios.

Hasta ahora, no hay un estudio comparativo detallado de la aceptabilidad de los diferentes tipos de saneamiento de heces posterior a uso de baños secos por parte de los usuarios, por lo tanto, no es completamente claro qué tipo de sistema es mejor aceptado en ciertas condiciones. Algunas preguntas se plantean tratando de encontrar razones potenciales que puedan explicar los factores que afectan la aceptabilidad de estos sistemas:

- ¿Se adapta el sistema a las necesidades y hábitos del usuario?
- ¿Son los sistemas de tratamiento lo suficientemente prácticos? es decir, ¿podrían usarse sin tener mayor problema al momento de dar un uso cotidiano?
- ¿Es necesaria la presencia de radiación solar?
- ¿Qué tan desfavorable es la implicancia de la dificultad sanear en las en intervalos del día dónde no esté presente la radiación solar?
- ¿Son estos sistemas lo suficientemente económicos?
- ¿Son sus desempeños térmicos, lo suficientemente buenos?
- ¿Los intervalos intervalos de reposicionamiento son adecuados?

Estos cuestionamientos permiten establecer, más que respuestas definitivas, ciertas consideraciones a tener presentes en la búsqueda de soluciones que se ajusten a las condiciones mismas de operación y cualidades intrínsecas de este tipo de equipos. Por lo tanto, lo más importante es evaluar la pertinencia de diseñar soluciones para cada aplicación en particular evaluando cada uno de los aspectos tratados

anteriormente o tratar de lograr soluciones integrales en las que deben hacerse concesiones en los distintos aspectos funcionales para obtener un resultado balanceado y satisfactorio.

En la siguiente tabla se presenta la lista de los requerimientos que deben lograrse en la solución final. Estas metas específicas permiten definir un mejor camino a seguir para la solución del problema.

Tabla 13: Requerimientos y nivel de exigencias para el diseño

Requerimiento	Nivel de exigencia
Rango de temperatura trabajo > Temperatura ambiente	Exigido
Tiempo máximo en alcanzar temperatura de trabajo: 1 hora	Exigido
Fácil construcción	Exigido
Tolerancia a posibles cambios de orientación	Deseable
Lograr saneamiento completo de material.	Exigido
Tratamiento sin necesidad de supervisión de usuario por periodos largos de tiempo.	Deseable
Manejo y disposición segura de residuos	Exigido
Relación costo- beneficio	Deseable

8.2 Establecimiento de la estructura de funciones

De acuerdo con los requerimientos presentados anteriormente se crea una estructura de funciones con el objeto de ver claramente las diferentes y posibles relaciones que se dan entre las entradas y salidas del sistema considerado. En la siguiente figura se muestra la función principal (Saneamiento del producto) con sus respectivas señales de ingreso (potencia solar y material sin tratar) y de salida (pérdidas térmicas, material tratado), luego esta función es dividida en subfunciones tratando de identificar los posibles mecanismos físicos involucrados en el proceso, de manera tal que se facilite la búsqueda de soluciones particulares encaminadas a la obtención de las mejores propuestas que satisfagan de manera integral la función principal planteada.

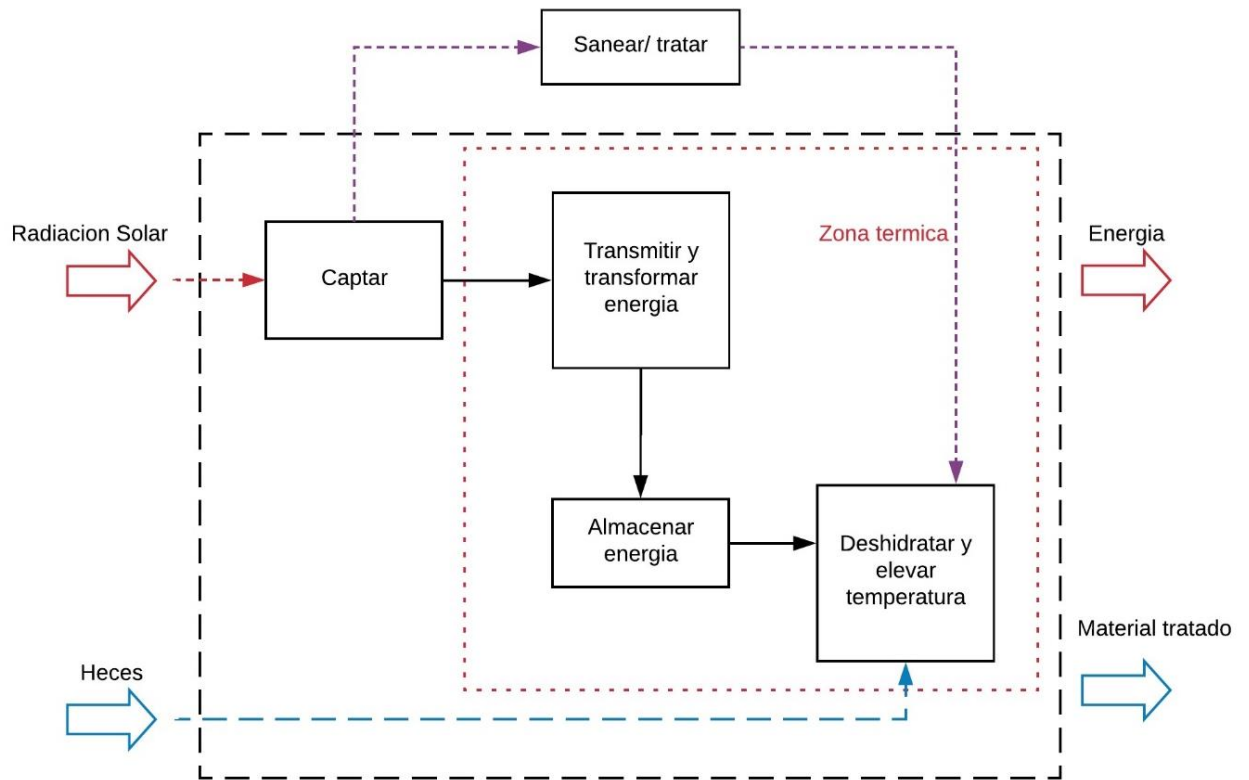


Ilustración 16: Diagrama de funciones principales y secundarias

Cada una de las subfunciones se explican a continuación:

1) Captar

La forma en la que se lleve a cabo la captación de la energía solar es un factor crítico para el desempeño térmico del sistema de tratamiento. La eficiencia con la que la radiación solar es colectada depende fuertemente de las configuraciones geométricas, la forma de las superficies y la orientación de las mismas. La frontera divisoria entre la captación y la transmisión de la energía no está muy definida, pero puede decirse que la captación tiene que ver más con aspectos espaciales condicionados por las características de distribución de la energía solar según las zonas de la tierra en las cuales se desarrolla la aplicación.

2) Transmitir y transformar

Habiendo definido la captación de energía en términos de configuraciones espaciales, la transmisión busca la forma de manejar la energía que ingresa al sistema de una manera eficiente, reduciendo al máximo las pérdidas ópticas y dirigiéndola a un punto específico para su transformación. La transformación de la energía tiene que ver con la estrategia empleada para la ganancia rápida de energía térmica por parte del sistema al transformar la radiación proveniente del sol.

3) Almacenar

El almacenamiento de la energía transformada nace de la necesidad de ir acumulando la energía ganada con el objetivo de alcanzar la mayor potencia energética disponible para elevar temperatura y alcanzar mayores velocidades de calentamiento. Por lo tanto, se debe lograr una condición termodinámica del sistema de modo de evitar pérdidas de energía hacia el ambiente y aprovecharla al máximo dentro del sistema.

8.3 Análisis y selección de alternativas según funciones

A continuación, se procede a analizar las alternativas dentro del mundo de deshidratación solar, de modo de ajustar un diseño óptimo para cada función de la estructura de funciones presentada anteriormente, teniendo en cuenta los factores que afectan a la aceptabilidad por parte de los usuarios.

8.3.1 Captar

Para que esta función se lleve a cabo de una forma óptima, depende tres factores importantes en la forma constructiva del equipo:

- Orientación

- Inclinación
- Geometría

Orientación e Inclinación

La posición del equipo en cualquier instante se describe con dos ángulos: la inclinación y el azimut (orientación).

El azimut corresponde al ángulo respecto del norte en que está rotado el equipo, este ángulo se mide desde el norte hacia el este, es decir:

Tabla 14: Orientación según Angulo Azimut

Azimut (°)	Equipo mira hacia
0	Norte
90	Este
180	Sur
270	Oeste

La inclinación corresponde al ángulo de elevación que tiene el panel respecto de un plano horizontal, es decir, un equipo con inclinación de 0° está instalado de forma horizontal y un equipo con inclinación de 90° está en posición vertical.

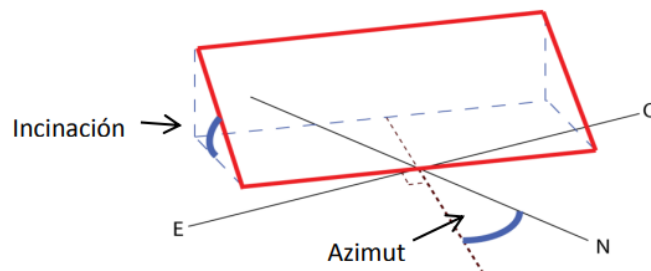


Ilustración 17: Esquema de un panel solar donde se señalan los ángulos de inclinación y azimut.

Los colectores solares deben ser instalados de manera que aprovechen al máximo la radiación solar disponible. Se considerará como la orientación óptima el norte geográfico y la inclinación óptima con relación al plano horizontal, dependiendo del período de utilización, uno de los valores siguientes [18]:

- Demanda constante anual: la latitud geográfica
- Demanda preferente en invierno: la latitud geográfica + 10°
- Demanda preferente en verano: la latitud geográfica – 10°

Desviaciones de la orientación (azimut de la superficie) de los colectores hasta 30° en relación con el norte geográfico, hacia el este o el oeste, son tolerables pues conllevan pérdidas de captación de la radiación solar, en media anual, menores que un 5%.

LOCALIDAD: VALPARAISO														
LATITUD: 33,03 [GRADOS] SUR														
Az	INCL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
180 al Norte	23	650,3	542,0	488,4	343,2	251,1	206,4	232,0	331,8	423,6	524,0	593,8	641,3	5228,0
	33	614,5	522,6	484,0	349,3	260,1	215,9	241,6	341,1	424,1	509,6	564,5	603,1	5130,4
	43	567,1	492,8	470,0	348,3	263,9	221,1	246,3	343,6	416,0	485,2	524,0	553,3	4931,7
	53	509,1	453,9	446,7	340,4	262,3	221,8	246,0	338,8	399,6	451,6	473,9	493,9	4637,9
	90	255,4	244,1	280,9	248,8	208,1	182,6	199,0	257,6	267,3	256,8	245,2	249,0	2894,7
150	23	638,0	534,4	473,8	333,8	240,6	197,6	221,7	321,0	409,9	515,9	583,8	629,0	5099,5
	33	596,9	511,5	462,7	335,6	244,7	203,0	226,6	325,5	404,0	497,5	549,5	585,6	4943,2
	43	568,3	484,9	442,5	330,7	244,1	204,5	227,1	323,3	390,2	472,2	523,0	558,2	4768,9
	53	521,0	446,0	415,4	319,5	238,6	201,9	223,0	314,7	369,9	436,2	480,3	511,4	4477,9
	90	348,3	304,8	309,3	224,3	174,6	156,6	169,0	218,6	277,0	304,4	324,2	271,3	3082,4
120	23	629,6	524,2	452,2	314,9	221,8	180,9	203,4	299,7	388,4	503,4	575,1	622,3	4915,8
	33	617,6	507,1	438,5	311,9	216,7	178,7	199,8	296,2	381,7	480,5	565,5	608,3	4802,6
	43	586,3	494,0	453,0	294,4	218,3	180,9	202,6	284,3	384,2	480,0	537,0	576,8	4691,8
	53	598,9	475,2	417,6	298,7	224,0	186,7	208,5	291,4	364,5	447,7	549,0	585,5	4647,8
	90	430,0	360,5	325,0	226,1	164,4	134,5	151,6	218,6	281,2	347,8	392,9	421,9	3454,5
90	23	626,9	514,0	429,2	292,0	201,9	165,0	185,9	273,5	365,1	489,8	570,8	622,7	4736,7
	33	628,3	489,3	435,2	283,2	208,4	158,3	186,7	273,0	366,3	470,3	567,5	618,3	4685,0
	43	603,6	502,7	416,5	287,5	198,4	164,3	184,0	266,2	363,8	469,3	552,6	592,8	4601,9
	53	567,1	479,8	419,9	276,6	207,0	149,7	181,8	269,7	349,9	467,3	519,6	557,2	4445,7
	90	500,7	436,4	328,5	222,1	167,7	137,5	154,2	217,0	271,4	407,1	460,6	484,9	3787,9
0 al Sur	23	652,6	507,0	407,0	252,9	168,8	130,6	151,1	230,8	337,9	475,4	586,1	657,0	4557,1
	33	618,4	471,2	365,1	217,2	142,0	111,2	127,4	193,7	298,9	438,4	553,2	626,2	4163,0
	43	571,7	426,9	317,0	181,7	119,9	98,6	110,6	161,3	255,0	393,7	510,0	583,1	3729,5
	53	514,5	375,1	264,3	149,7	114,2	93,8	105,3	140,6	209,0	342,6	456,9	528,9	3294,8
	90	292,6	201,8	162,0	116,8	87,7	71,8	80,7	109,9	142,2	188,0	260,5	304,5	2018,4

Ilustración 18: Irradiación mensual y anual en diferentes inclinaciones y azimut [MJ/m²]. [19]

Debido a que se pretende darle un uso durante todo el año, para el diseño se elige una inclinación de 33°, la cual será fija.

Se escoge la orientación óptima para el equipo, la cual es orientado hacia el norte. Es importante mencionar que esta característica es modificable en el funcionamiento de estos equipos, por lo que dependiendo las condiciones climáticas convendrá en algunos casos variar la orientación.

Geometría del equipo

En el capítulo 7 se puede apreciar que se la determinación de la geometría está en función del propósito de los distintos tipos de equipos solares.

Para cumplir con el objetivo del equipo se elige una geometría que posea un rango entre 30 [°C] y 100 [°C], por lo que se escoge un colector de tipo plano.

Tabla 15: Resumen de selección según la función “Captación de energía”

Inclinación	33°
Orientación	Norte
Geometría	Colector plano

8.3.2 Transmitir y transformar

Para analizar y seleccionar la alternativa adecuada para cumplir esta función, se debe tener en cuenta que el objetivo a cumplir es elevar la temperatura del sistema y transmitir energía al aire que se usará como medio secante.

Como alternativas se pueden encontrar:

- **Reflexión:** Consiste en transferencia de energía mediante materiales reflexivos, los cuales concentran los rayos solares en un punto o varios. La ventaja de estos es que pueden elevar la temperatura de forma rápida mientras

haya radiación directa (sin nubes), en caso de haber nubes o estar en presencia de radiación en gran parte difusa, el sistema no es capaz de funcionar.

- **Absorción:** Consiste en absorber energía proveniente de la radiación por medio de cuerpos negros (los cuales tienen un alto coeficiente de absorción), si bien a diferencia de los medios reflexivos hay un mayor tiempo de demora en llegar a las altas temperaturas deseadas, la ventaja de este medio es que a pesar de que haya radiación difusa funciona muy bien, y en caso de que los rayos solares se vean interrumpidos por nubes, la temperatura del cuerpo negro tarda en descender, por ende acumula mayor energía y si se complementa con un buen sistema de almacenamiento se podrían evitar en forma notoria la pérdidas de calor hacia el ambiente.
- **Mixta:** Corresponde a la combinación de las alternativas anteriores. La ventaja de utilizar ambas es que es posible poder alcanzar temperaturas elevadas de forma rápida mediante la concentración puntual de la radiación y a la vez poder mantener esta energía acumulada por mayor tiempo en un cuerpo negro.

Teniendo en cuenta las alternativas antes mencionadas, la mejor opción es la mixta debido a la forma eficiente de transmitir y transformar la energía solar. Ahora bien, el hecho de utilizar esta alternativa hace necesario disponer con espacios suficientes para su instalación y buen funcionamiento, de no ser así es recomendable utilizar una alternativa absorbente, teniendo en cuenta lo variante que es la nubosidad en la región de Valparaíso.

Tabla 16: resumen de selección de alternativa para transmisión de energía

Primera Alternativa	Mixta
Segunda Alternativa	Absorbente

8.3.3 Almacenamiento de energía

Para analizar esta función es necesario realizar el análisis térmico de cualquier tipo de panel de placa plana, se deben tener en cuenta aspectos como la cantidad de energía que incide en el panel (radiación incidente) y las pérdidas térmicas. Es por esto que es necesario realizar un volumen de control para generar las ecuaciones con las cuales se logran determinar las pérdidas y factor de remoción de calor.

A continuación, se presenta la ecuación que gobierna la transferencia de calor en el panel, teniendo en cuenta la cantidad de calor útil, la cantidad de calor ingresada y la cantidad de pérdidas en el sistema:

$$Q_u = A_s \cdot G_t(\tau\alpha) - \text{Pérdidas} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (8.3.3.1)$$

Donde:

- Q_u : Cantidad de energía transferida al fluido [W]
- A_s : Área de incidencia solar [m^2]
- G_t : Radiación [$\frac{W}{m^2}$]
- τ : Transmisividad
- α : Absorción de placa
- \dot{m} : Flujo másico del aire que pasa por el panel [$\frac{kg}{s}$]
- C_p : Calor específico del fluido [$\frac{Joule}{kg \cdot K}$]
- T_o : Temperatura de salida del aire del panel [$^{\circ}C$]
- T_i : Temperatura de entrada del aire del panel [$^{\circ}C$]

8.3.3.1 Determinación de cantidad de energía

Se sabe que la fuente de energía para calentar el aire en el equipo es la radiación que incide directamente en la superficie del módulo. Ahora bien, no toda la energía es transmitida hacia el aire, más bien solo una porción de esta será utilizada.

Cuando la radiación incide en el vidrio, parte de la energía rebotará, parte de la energía se absorbe y la otra porción ingresará por la cubierta. La porción admitida está determinada por la transmisividad (τ) del material. A su vez, parte de esta energía ingresada es absorbida (α) por la placa negra y el resto se pierde en forma de calor quedando atrapada entre la cubierta y la placa.

A continuación, se presenta el comportamiento de un rayo incidente en el panel.

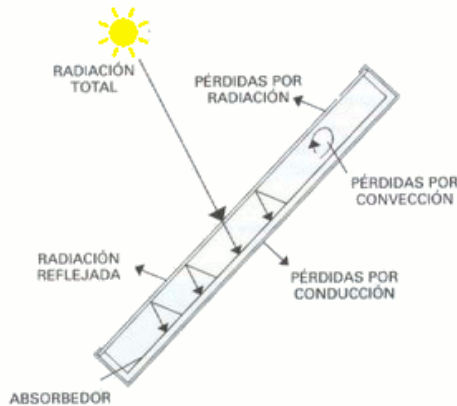


Ilustración 19: Comportamiento de radiación solar incidente

Se puede apreciar en la ilustración anterior que la radiación incidente atraviesa la cubierta logrando transmitir parte de su energía a la placa. Cuando la placa se calienta lo suficiente esta comienza a irradiar calor y a transmitir por convección hacia el aire que circula con un flujo constante dentro del panel. Se observa también que existen diversas pérdidas de calor hacia el ambiente, tanto por la cubierta superior como por la cubierta inferior.

Por la primera ley de termodinámica se tiene:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (8.3.1.1.1)$$

Donde:

α : Absorbencia: fracción de energía absorbida

τ : Transmisividad: fracción de energía transmitida

ρ : Reflexividad: Fracción de energía reflejada

Se observa que parte de la radiación se refleja y se pierde, pero un gran porcentaje de esta entra a través de la cubierta (transmisividad), luego parte de estos rayos revotan en la superficie negra, pero no logran salir por las características de su longitud de onda.

La otra parte de los rayos se transmiten a la placa color negra (absorción), lo cual determinara el calor útil para el calentamiento del aire.

La energía incidente en el panel está determinada por la radiación que llega multiplicada por un factor de “pérdidas”, los cuales son la transmisividad del policarbonato o vidrio; y la absorcividad de la placa negra.

$$S_t = (\alpha \cdot \tau) \cdot G_t \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (8.3.1.1.2)$$

Donde S_t corresponde al flujo radiativo absorbido por el colector por unidad de área.

A continuación, se presentan valores típicos para α y τ , según literatura:

Tabla 17: Absorbencia de radiación solar y emisividad para diferentes materiales [20]

Material	α (-)	ϵ (-)
Nieve	0,13	0,82
Ladrillo	0,55	0,92
Concreto	0,6	0,88
Alquitrán	0,93	0,93
Pintura negra	0,94	0,88

Tabla 18: Transmisividad para diversos materiales

Material	τ (-)
----------	------------

Vidrio común de 3 a 5 [mm] de espesor	0,9
Vidrio Esmerilado	0,4 - 0,6
Plástico transparente nuevo	0,9
Plástico transparente después de un año	0,7
Doble vidrio	0,8

Luego el factor a utilizar para el cálculo del flujo radiativo absorbido por el panel será:

$$(\alpha \cdot \tau) = 0,94 \cdot 0,8 = 0,75 \quad (8.3.1.1.3)$$

8.3.3.2 Ganancia de energía

La energía utilizada en el colector estará determinada por la cantidad de masa en movimiento dentro de este, el calor específico del aire y la diferencia de temperaturas entre la entrada del aire y la salida.

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (8.3.1.2.1)$$

8.3.3.3 Perdidas térmicas

Las pérdidas térmicas en el colector se pueden modelar a través de una serie de resistencias térmicas:

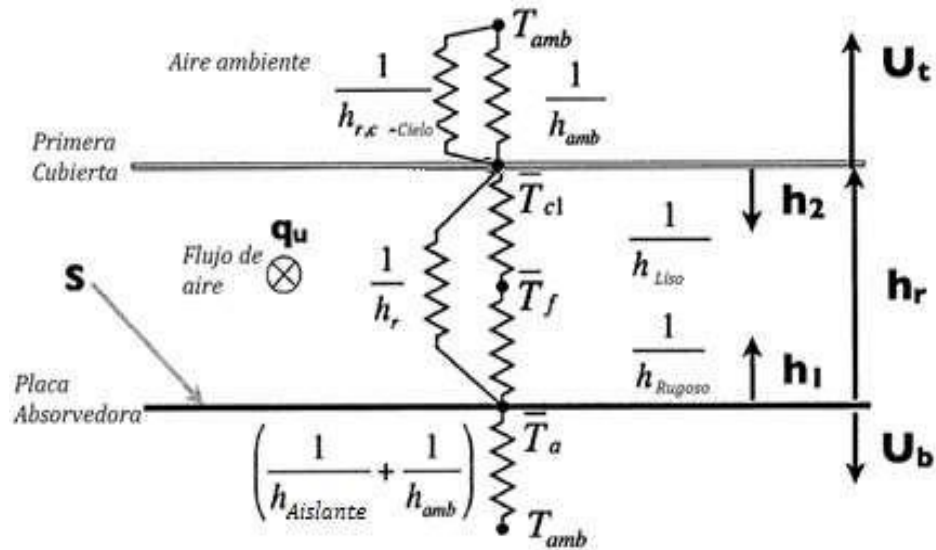


Ilustración 20: Representación pérdidas térmicas a través de resistencias para panel con una cubierta

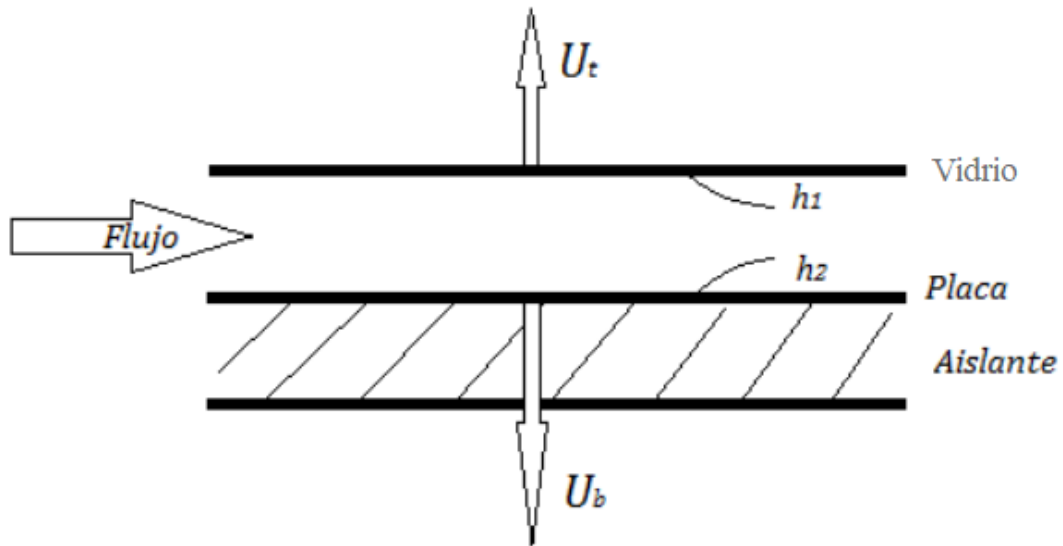


Ilustración 21: Representación gráfica de panel con una cubierta, y sus coeficientes de pérdidas
Luego se consideran tres volúmenes de Control: cubierta, la placa y el fluido, las que están relacionadas en las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$U_t \cdot (T_a - T_c) + h_r \cdot (T_p - T_c) + h_1 \cdot (T_f - T_c) = 0 \quad (8.3.3.3.1)$$

$$S + U_b \cdot (T_a - T_p) + h_2 \cdot (T_f - T_p) + h_r \cdot (T_c - T_p) = 0 \quad (8.3.3.3.2)$$

$$h_1 \cdot (T_c - T_f) + h_2 \cdot (T_p - T_f) = q_u \quad (8.3.3.3)$$

Considerando todas las pérdidas, y resolviendo el sistema de ecuaciones, (Resolución con referencia en el libro “Solar engineering of thermal processes”, de “John duffie and William Beckman”) se obtiene:

$$q_u = F' \cdot [S - U_L \cdot (T_f - T_a)] \quad (8.3.3.3)$$

Donde:

$$U_L = \frac{(U_t + U_b) \cdot (h_1 \cdot h_2 + h_1 \cdot h_r + h_2 \cdot h_r) + U_B \cdot U_t \cdot (h_1 + h_2)}{h_1 \cdot h_r + h_2 \cdot U_t + h_2 \cdot h_r + h_1 \cdot h_2} \quad (8.3.3.4)$$

$$F' = \frac{h_1 \cdot h_r + h_2 \cdot U_t + h_2 \cdot h_r + h_1 \cdot h_2}{(U_t + h_r + h_1) \cdot (U_b + h_2 + h_r) - h_r^2} \quad (8.3.3.5)$$

Donde:

- U_L : coeficiente Global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
- F' : factor de remoción de calor local [-]
- U_t : coeficiente de pérdida de la parte superior $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
- U_b : Coeficiente de pérdida de energía a través de la parte inferior del colector $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
- $h_1; h_2; h$: coeficiente de transferencia de calor por convección al aire $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
- h_r : coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

Ahora bien, para el caso donde se tiene más de una cubierta (vidrio o policarbonato) se tiene el siguiente diagrama modelado por resistencias:

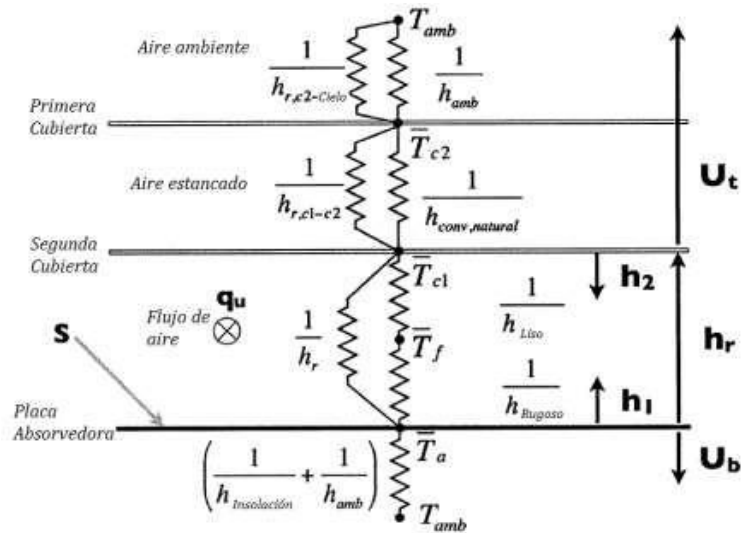


Ilustración 22: representación pérdidas térmicas a través de resistencias para panel con dos cubiertas

Considerando la resolución de las ecuaciones que gobiernan los volúmenes de control, se pueden obtener los valores U_L y F' para sistemas con más de una cubierta:

$$U_L = U_t + U_b \quad (8.3.3.3.6)$$

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_1 + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_r}} \right)}} \quad (8.3.3.3.7)$$

Luego es necesario obtener los valores teóricos de U_t , U_b , h , h_r , con los que se obtiene el coeficiente global de transferencia de calor U_L .

Si bien el valor de U_t se puede calcular a través de las resistencias, estas solo son convenientes para los cálculos a mano, y se debe destacar que conlleva un análisis extenso y un muy arduo trabajo.

Es por esto que se desarrolló una ecuación empírica, que es útil para los cálculos tanto a mano como a computador. Fue desarrollado por Klein (1979) siguiendo el

procedimiento básico de Hottel y Woertz (1942). Esta relación se ajusta a las curvas para la interfaz de usuario, en un rango temperaturas medias de la placa. entre la temperatura ambiente y 200 °C con un error de $\pm 0,3$ [W/m² °C].

Esta relación se encuentra descrita “Solar engineering of thermal processes”, de “John duffie and William Beckman”.

$$U_t = \left(\frac{N}{\left(\frac{C}{T_p}\right) \cdot \left[\frac{T_p - T_a}{N + f}\right]^e + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_p + T_a) \cdot (T_p^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591 \cdot N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2 \cdot N + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (8.3.3.3.8)$$

Donde:

- N = número de cubiertas que tiene el panel
- $f = (1 + 0,089 \cdot h_w - 0,1166 \cdot h_w \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 - 0,07866 \cdot N)$
- $C = 520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot \beta^2)$; para $0^\circ < \beta < 70^\circ$
- β : Angulo de inclinación en grados.
- $e = 0,430 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_p}\right)$
- ε_g : Emisividad de vidrio
- ε_p : Emisividad de la placa
- T_a : temperatura ambiente [°C]
- T_p : temperatura de la placa [°C]
- h_w : Coeficiente de transferencia de calor hacia el aire $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
- σ : Constante de Boltzmann $\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor hacia el aire:

$$h_w = \frac{8,6 \cdot V^{0,6}}{L_v^{0,4}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right] \quad (8.3.3.3.9)$$

Donde:

- V = velocidad del aire [m/s]
- L_v = Raíz cubica del volumen del panel [m]

Luego para la obtención del coeficiente de pérdidas por la parte inferior del colector, se tiene la siguiente relación:

$$U_b = \frac{k}{L_a} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (8.3.3.3.10)$$

- k = Conductividad térmica del material aislante $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- L_a = Ancho del aislante [m]

Para la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección al fluido de trabajo “h”, se tiene lo siguiente:

$$h = Nu \cdot \frac{k}{D_h} \quad (8.5.16)$$

- k : conductividad térmica del aire a 35°C (0,02625 $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$)
- D_h : Diámetro equivalente [m] $D_h = \frac{4 \cdot S}{P}$; S = sección ; P = perimetro
- Nu : número de Nusselt, que para este caso se considerará un flujo turbulento, con: $0,5 \geq Pr \geq 2000$

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (8.3.3.3.11)$$

Donde:

- $f = (0,79 * \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (8.3.3.3.12)$

$$\bullet \ Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (8.3.3.3.13)$$

Finalmente, para obtener el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r :

$$h_r = \frac{\sigma \cdot (T_p^3 - T_g^3) \cdot (T_p - T_g)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \quad (8.3.3.3.14)$$

8.3.3.4 Factor de remoción de calor

Ya obtenido el factor de remoción de calor local F' y el coeficiente global de transferencia de calor U_L , se puede obtener el el factor de remoción de calor del colector F_R , a travez de la siguiente relación:

$$Q_u = F_R \cdot A \cdot [S - U_L \cdot (T_i - T_a)] \quad (8.3.3.4.1)$$

Y sabe que:

$$q_u = F' \cdot [S - U_L \cdot (T_f - T_a)] \quad (8.3.3.4.2)$$

Luego despejando se obtiene un factor F'' que esta dado por (desarrollo detallado en libro “Solar engineering of thermal processes”, de “John duffie and William Beckman” Pag. 277):

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L \cdot F'} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p}\right) \right] \quad (8.3.3.4.3)$$

Por lo tanto:

$$F_R = F'' \cdot F' \quad (8.3.3.4.4)$$

8.3.4 Datos y cálculos obtenidos

Tabla 19: Tabla de parámetros para calculo

Parámetros Importantes	
N (número de cubiertas)	2

ε_p [-]	0,85
ε_g [-]	0,9
β [°]	33
C [-]	491,11972
σ [$W/m^2 \cdot K^4$]	5,67E-08
k poliuretano [$W/m^2 \cdot K$]	0,022
El poliuretano [m]	0,05
K aire [$W/m^2 \cdot K$]	0,029
$(\tau\alpha)$ [-]	0,75

Luego se calcula la transferencia de calor hacia el aire.

Tabla 20: calculo transferencia de calor hacia el aire

L_v [m]	V [m/s]	h_w	f
0,79370053	0,65	7,28423248	0,78062202

Además, se deben tener en consideración las propiedades del aire a 20°C, que es una temperatura de interés para el caso.

Tabla 21: Propiedades del aire a 20°C

Propiedades del aire a 20°C	
Densidad [kg/m^3]	1,204
Viscosidad [$kg/m \cdot s$]	1,83E-06
C_p [$J/kg \cdot K$]	1007
k [$W/m \cdot K$]	0,02514
Presion [Atm]	1
R [$Kpa \cdot m^3/kg$]	0,287

Se procede a obtener los números adimensionales para la configuración para una velocidad, para luego hacer los cálculos correspondientes y obtener el U_L y F_R .

Tabla 22: cálculo de números adimensionales

Velocidad por Ducto [m/s]	0,65
Superficie [m^2]	0,0133096
Perímetro [m]	0,6128

D equivalente [m]	0,086877285
Reynolds	3,73E+04
fe	2,24E-02
Pr	7,31E-02
Nu	1,67E+01
h [$W/m^2 \cdot K$]	4,84
F'	8,36E-01
F''	0,921660098
FR	7,70E-01

8.4 Contexto operacional

Para el diseño se tendrá en cuenta ciertos datos importantes a tener en consideración para el diseño final. Ya que existen variables que tienen implicancia directa en el funcionamiento. Estos datos son los siguientes:

- 1) Lugar: el lugar donde se hará prueba del prototipo será en Laguna Verde, ubicado en la V región de Valparaíso. Este dato es importante ya que hay que tener en cuenta los siguientes datos:
 - Radiación solar promedio: 1431 [kWh/m^2]
 - El lugar no presenta conexión a la red eléctrica ni posee alcantarillado.
 - Se considera que el dispositivo está destinado para sectores rurales, que cuentan con espacio para un equipo de gran envergadura. Teniendo en cuenta que este debe ser transportable.
- 2) Baño seco presente en el lugar: existen distintos tipos de dispositivos que se diferencian principalmente en el recipiente donde se depositan las heces. Por lo que hay que tener es:

- Capacidad de contenedor de heces: un promedio de volumen de contenedor es de 12 litros, teniendo en cuenta que el contenedor debe ser transportable por una persona y además debe tener un tamaño que se adapte bajo el wáter del baño seco.
- 3) Cantidad de heces a tratar: según el resultado calculado para la cantidad de heces producidas por una familia, se obtuvo que en aproximadamente 7 días un contenedor de heces bajo el WC es llenado completamente, lo cual equivalen a lotes de 12 [kg] de material a tratar aproximadamente. Se debe tener en cuenta un sistema de respaldo ya que al tener en cuenta un tratamiento por deshidratación, hay que considerar que existen días en que no es posible deshidratar debido a días nublados. Por lo tanto, se ajusta el sistema para que pueda tratar el doble de cantidad.
- 4) Se debe tener en cuenta que, al ser una localidad costera, la humedad relativa es variable, también es común en la zona costera de Valparaíso que exista gran nubosidad. Por lo que es posible tener en cuenta un acumulador de heces previo al tratamiento.
- 5) Propiedades de las heces a tratar: Como ya fue mencionado anteriormente, las propiedades de las heces son muy variables, dependiendo netamente de las características de cada persona y su alimentación. La propiedad de interés para el tratamiento por deshidratación es el contenido de humedad, que para efecto de cálculos se tomará como promedio de 80%, según la literatura esta se encuentra entre un 66% y 80%. [1] [21]

Por lo tanto, según la ecuación 7.4.1.1 cada por cada kilogramo de heces a tratar existen 800 gramos de agua. Y el objetivo del tratamiento es lograr un porcentaje de 25% de humedad, por lo tanto, por cada kilogramo de material tratado, se permiten 250 gramos de agua.

Ahora bien, dado que las heces están mezcladas con material secante, disminuye el porcentaje de humedad inicial considerablemente según el siguiente cálculo, apoyándose de la ecuación 7.4.1.1.

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_o} = \frac{W_o - W_d}{W_o}$$

Para un día se calculó que la cantidad de heces producida por una familia es de 1,625 kg, de los cuales 1,25 kg corresponden a heces y 0,375 a material secante.

Por lo tanto:

$$W_o = \text{heces} + \text{material secante}$$

$$\text{heces} = 80\% \text{ agua} + 20\% \text{ heces secas.}$$

Así:

$$W_o = 0,8 * \text{heces} + 0,2 * \text{heces} + \text{material secante}$$

$$W_o = 0,8 * 1,25[\text{kg}] + 0,2 * 1,25[\text{kg}] + 0,375 [\text{kg}]$$

Y se tiene que $W_o = W_w + W_d$, donde W_d corresponde a todo el material seco, y W_w a la cantidad de agua contenida en el material. Resultando:

$$W_d = 0,625 [\text{kg}] ; W_w = 1[\text{kg}]$$

Por lo tanto, la cantidad de humedad es $M_{wb} = \frac{1}{1,625} = 0,62 \left[\frac{\text{kgAgua}}{\text{kgMaterial}} \right]$ lo que es equivalente a decir que el material tiene un 62% de humedad.

Por otra parte, se sabe que, para lograr un tratamiento completo, es necesario disminuir el contenido de humedad a un 25%. Luego es necesario saber la cantidad de agua necesaria a eliminar para lograr este objetivo. Teniendo en cuenta que son 24 kg de material a tratar.

Inicial:

$$0,62 \left[\frac{\text{kgAgua}}{\text{kgMaterial}} \right] = \frac{W_w}{W_o} \rightarrow W_w = 14,88 [\text{kg}]; W_d = 9,12 [\text{kg}]$$

Final:

$$0,25 \left[\frac{kg\text{Agua}}{kg\text{Material}} \right] = \frac{W_o - W_d}{W_o}$$

Se calcula el nuevo peso total y la cantidad de humedad final.

$$W_o = 12,16 [kg] \rightarrow W_w = 12,16 [kg] - 9,12[kg] = 3,04 [kg]$$

Finalmente se calcula la cantidad de agua necesaria a eliminar del material, restando la cantidad inicial y final de agua:

$$14,88 [kg] - 3,04 [kg] = 11,84[kg]$$

- 6) El material a tratar no cuenta con estudios de curvas de secado, tanto de tiempo como de velocidad. Por lo tanto, estas curvas deberán ser obtenidas experimentalmente con el prototipo fabricado.

8.5 Cálculo aproximado de producción de heces para una familia

En promedio, un adulto excreta entre 0,12 y 0,4 kilos de heces diarias, dependiendo de la dieta y la cantidad de comida ingerida. Por ejemplo, en Kenia, la dieta vegetariana y con alto contenido de fibra eleva el número a 0,53 kilos diarios en promedio; mientras que la dieta con alto contenido de proteínas en Suecia da un promedio diario de 0,14 kilos. En caso de no existir información local, como es el caso de Chile, la presente tabla puede servir de guía:

Tabla 23: Composición de las heces

Parámetro	Unidad	Heces	
		Dieta con alto contenido proteico	Dieta con alto contenido de fibra
Masa húmeda	Kg/persona/día	0,12	0,4
	Kg/persona/año	44	146
Contenido de agua en la masa húmeda	%	80	80
Nitrógeno	g/persona/año	550	No disponible
Fósforo	g/persona/año	183	No disponible
Agua tras seis meses de deshidratación	%	25	25
Masa deshidratada	Kg/persona/año	20	66

Para realizar el cálculo preliminar de la cámara de secado se toma en cuenta una familia compuesta por 2 adultos y 3 niños y/o ancianos y se calcula la producción de heces por día.

- 2 adultos x 0,4 kg/día = 0,8 kg/día
- 3 niños/as/ancianos/as x 0,15 kg/día = 0,45 kg/día
- Total = 1,25 kg/día
- Reducción estimada por ausencia (-10%) = -0,125 kg/día
- Pérdida de humedad antes de tratamiento (5%) = -0,0625 kg/día
- Papel higiénico = 0,125 kg/día
- Material de cobertura = 0,25 kg/día
- Toda la familia en un día = 1,43 kg/día
- Margen de seguridad (+20%) = 0,29 kg/día
- Teniendo en cuenta que la mezcla de 1 kg de material secante y heces corresponde a 1 litro en volumen. [22]
- Volumen producido por día= 1,72 litros/día
- Sabiendo que el volumen promedio del contenedor bajo el wáter del baño seco es de 12 litros. Este contenedor se llenará en 7 días.

8.5 Diseño preliminar

8.5.1 Requerimientos del diseño de la cámara de secado

La cámara de secado para el prototipo debe cumplir con ciertas características:

- Poseer una configuración tal que facilite su limpieza.
- No debe condensarse agua en lugares que interfiera con el proceso de secado.
- Debe permitir la salida del aire húmedo.
- Debe contener dispositivo para remover las heces en interior.
- La entrada del aire caliente en la cámara de secado debe distribuirse de forma homogénea.
- Seleccionar materiales resistentes al calor y a la corrosión para la construcción de la cámara de secado.
- El diseño debe ser de fácil construcción.
- El diseño debe ser ergonómico.
- Deben minimizarse todas las pérdidas de calor de la cámara al medio ambiente.
- No debe permitir la entrada de insectos, animales u otro agente contaminante dentro de la cámara de secado.

8.5.2 Limitaciones de la cámara de secado

- Tamaño máximo de las bandejas para fácil manejo.
- Materiales deben tener disponibilidad en el mercado nacional y ser de fácil acceso comercial para construcción de deshidratador.
- Dimensiones máximas de la cámara de secado que se ajuste al espacio donde será ubicado.

5.2.3 Diseño esquemático

Para comenzar con el diseño preliminar se tienen en consideración el estudio realizado en la sección 7 y 8. Y junto a estos antecedentes se decide tomar como base

de diseño los sistemas utilizados en cocina solar como son los hornos solares, junto con los sistemas solares utilizados en deshidratación de productos.

Se procede a utilizar el Software Autodesk Inventor para bosquejar un primer diseño que cumpla con las funciones principales estudiadas anteriormente.

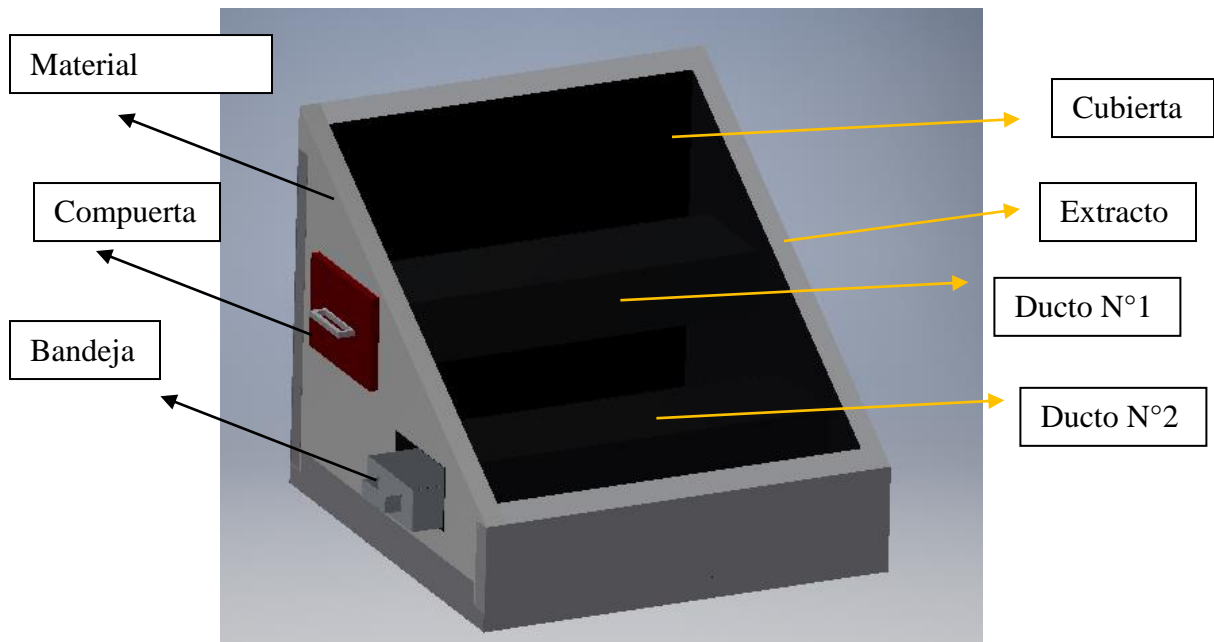


Ilustración 23: Diseño preliminar en software Autodesk Inventor

El diseño tiene como base la forma de un colector tipo plano, el cual debido al contexto operacional posee un ángulo de incidencia de entre 30° y 35° . Posee dos cámaras de secado, en las cuales se introducirán bandejas que contienen el material a secar. Cada una de esas cámaras de secado tiene en un extremo una compuerta, la cual tiene la función de sellar la cámara luego de hacer ingreso de la bandeja de secado. Y en el otro extremo de los ductos se encuentra un extractor de aire, encargado de remover el aire a alta temperatura que se encuentra.

El funcionamiento es el siguiente, la placa negra aumenta su temperatura debido a la absorción de irradiación del sol. Esta placa libera energía y transfiere calor hacia el aire, el aire por su parte aumenta su temperatura dentro del colector debido a la transferencia de calor por convección desde la placa negra y por consiguiente

disminuye su humedad relativa, haciendo que el aire tenga una mayor capacidad de retener humedad. Por otro lado, los extractores de cada ducto funcionan con un panel fotovoltaico, y son los encargados de retirar el aire caliente del colector, haciéndolo atravesar todo el ducto, y pasando a su vez por encima del material a secar, con el fin de aumentar su humedad relativa, retirando humedad del material.

8.6 Comparación y selección de materiales

En esta sección se realiza una comparación entre materiales que corresponden a las subfunciones del prototipo. De esta forma es posible elegir el material con que se construirá de manera que cumpla la función principal solicitada lo mejor posible.

La matriz de decisiones en un método utilizado para la selección de la idea más competitiva entre un grupo de alternativas, donde se eligen los parámetros de mayor relevancia para servir como criterios de selección a los cuales se aplica un valor porcentual según su importancia en el diseño, apoyándose en investigación y evaluación de experiencia para así poder llegar a una solución acertada.

Para realizar la evaluación en las matrices de decisiones cada criterio en cada propuesta se evaluará con distintos criterios dando puntajes con números enteros. La alternativa con mayor puntaje será la seleccionada como ganadora para continuar el proceso de diseño.

8.6.1 Aislación y almacenamiento de energía

Como material para evitar de mejor forma la pérdida de calor hacia el ambiente, y según lo estudiado en la sección 8, se procede a comparar los siguientes materiales.

Opción 1: Estructura de madera, planchas de tablero de construcción y lana mineral

Opción 2: Estructura de Metalcom, planchas acero galvanizado y aislante de lana mineral

Opción 3: Estructura y aislación de Instapanel relleno de poliuretano

Opción 4: Estructura y aislación de Instapanel relleno de Poliestireno.

Para evaluar estas 4 opciones de materiales de construcción para aislación, se toman en cuenta los siguientes factores:

1) Coeficiente de conducción: El coeficiente de conductividad térmica expresa la cantidad o flujo de calor que pasa, por unidad de tiempo, a través de la unidad de superficie de una muestra del material, de extensión infinita, caras plano paralelas y espesor de unidad, cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas igual a la unidad, en condiciones estacionarias.

Para ponderar el material a elegir se designará de mayor a menor coeficiente de conductividad térmica con un número del 1 al 3. Siendo el material con mejor ponderación aquel que tenga una menor conductividad térmica.

Tabla 24: Ponderación según conductividad térmica

Material	Conductividad Térmica W/(m·K)	Valoración
Lana mineral	0,034 a 0,041	2
Poliestireno	0,034 a 0,045	1
Poliuretano	0,023	3

2) Material no inflamable: aquellos materiales que presentan inflamabilidad se ponderan con un puntaje 0, mientras que los materiales que no presentan inflamabilidad se ponderan con puntaje 2.

Tabla 25: Ponderación según inflamabilidad

Material	Inflamable	Valoración
Lana mineral	No	2
Poliestireno	Si	0
Poliuretano	No	2

Madera	Si	0
--------	----	---

3) Resistencia a la humedad: Para aquellos materiales que no vean afectado su composición por la humedad y su almacenamiento en intemperie, reciben una un puntaje de 2 puntos, para aquellos que se vean afectados reciben un puntaje de 0.

Tabla 26: Ponderación según resistencia a la humedad

Material	Resistencia a humedad	Valoración
Opción 1	No	0
Opción 2	Si	2
Opción 3	Si	2
Opción 4	Si	2

A continuación, se presenta la ponderación final del ítem aislación para las distintas opciones presentadas.

Tabla 27: Ponderación final ítem "aislación"

Material	Conductividad Térmica	No Inflamable	Resistencia a humedad	Total
Opción 1	2	0	0	2

Opción 2	2	2	2	6
Opción 3	1	0	2	3
Opción 4	3	2	2	7

8.6.2 Transmisión de energía en cubierta

Como material para aprovechar de mejor forma la entrada de energía en forma de radiación, se busca uno de tal forma que su coeficiente de transmisividad sea alto. Al mismo tiempo se busca que la cubierta tenga la particularidad de tener una buena aislación térmica, de modo que la energía acumulada dentro del colector no se pierda al ambiente. De acuerdo a lo estudiado en la sección 8, se procede a comparar los siguientes materiales.

Opción 1: Cubierta de vidrio simple

Opción 2: Cubierta de vidrio doble

Opción 3: Policarbonato

Para evaluar estas 3 opciones de materiales de construcción para transmisión de energía, se toman en cuenta los siguientes factores:

1) Transmisividad: Como se estudió en la sección 8, una mayor transmisividad ayuda a captar un mayor porcentaje de energía en forma de radiación solar. Por lo tanto, se le asignará un puntaje de 1 a 3, siguiendo el orden del material de menor a mayor transmisividad.

Tabla 28: Ponderación según transmisividad de material

Material	τ (-)	Valoración
Vidrio común de 3 a 5 [mm] de espesor	0,9	3

Doble vidrio 9 [mm] de separación.	0,8	2
Polycarbonato alveolar	0,78	1

2) Conductividad térmica: Se busca que el material tenga las mínimas pérdidas de energía por medio de la cubierta, por lo tanto, el material con mejor puntaje en ponderación será aquel que ofrezca un menor índice de conductividad térmica. Para ponderar el material a elegir se designará de mayor a menor coeficiente de conductividad térmica con un número del 1 al 3. Siendo el material con mejor ponderación aquel que tenga una menor conductividad térmica.

Material	Conductividad Térmica W/(m·K)	Valoración
Vidrio común de 3 a 5 [mm] de espesor	5,7	1
Doble vidrio 9 [mm] de separación.	2,91	3
Polycarbonato alveolar	3.9	2

3) Vida útil: es importante que el material elegido perdure en el tiempo, ya que la transmisividad del material se puede ver afectada, por lo que se elegirá aquel material que presente una vida útil mayor. Para materiales que tengan una vida útil menor a 5 años se asignará un puntaje de 1, mientras que para mayores de 5 años se asigna un puntaje de 3.

Tabla 29: Ponderación según vida útil del material.

Material	Vida útil [años]	Valoración
----------	------------------	------------

Vidrio común de 3 a 5 [mm] de espesor	25 a 30	3
Doble vidrio 9 [mm] de separación.	25 a 30	3
Polycarbonato alveolar	2 a 4	1

A continuación, se presenta la ponderación final del ítem transmisión de energía en cubierta para las distintas opciones presentadas.

Tabla 30: Ponderación final ítem transmisión de energía en la cubierta

Material	Transmisividad	Conductividad Térmica	Vida útil	Total
Opción 1	3	1	3	7
Opción 2	2	3	3	8
Opción 3	1	2	1	4

8.6.3 Transformación de energía

Para poder transformar la energía en calor y transmitirla hacia el fluido de trabajo, se elige aquel que posea una buena absorbencia y emisividad.

Tabla 31: propiedades de pintura negra

Material	α (-) Absorbencia	ε (-) Emisividad
Pintura negra	0,94	0,88

Se elige según lo estudiado en sección 8 utilizar pintura negra para lograr el objetivo de absorber energía en forma de radiación y transformarla en calor.

8.7 Dimensiones

Para las dimensiones hay que tener en cuenta la cantidad de heces producida por una familia promedio, calculada en la sección 8.4.

Las variables que limitan las dimensiones del prototipo son la cantidad de heces que contiene un contenedor lleno, el cual aproximadamente es de 12 litros. Y por otro lado el prototipo debe tener una dimensión que lo haga transportable tanto dentro como fuera del hogar, además de ocupar un espacio prudente. También una variable limitante del tamaño es el ángulo de incidencia solar del colector, el cual va entre 30 y 35°.

Además de esto como se vio anteriormente, hay que tener cuenta que en el prototipo se incluye una cámara de secado adicional, de tal forma de añadir modos de uso, como por ejemplo el de dejar un ducto stand by. También de acuerdo al material elegido como aislante, se considera un margen de 50 mm de ancho.

Teniendo en cuenta esto es que se esboza una aproximación de como debiese ser el perfil del prototipo.

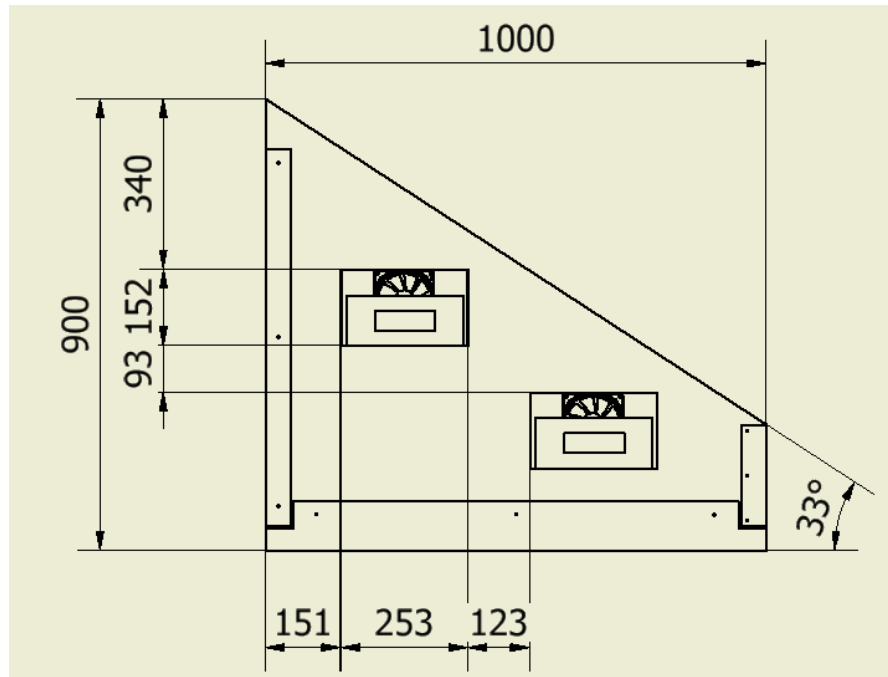


Ilustración 24: Perfil prototipo

La bandeja contenedora del material, es la que define según la cantidad de material a secar, la dimensión solicitada. La línea roja marca el nivel máximo para secar, de tal forma que la torta de secado esté a 6,5 centímetros, dando así aproximadamente el volumen de secado requerido de aproximadamente 12 litros.

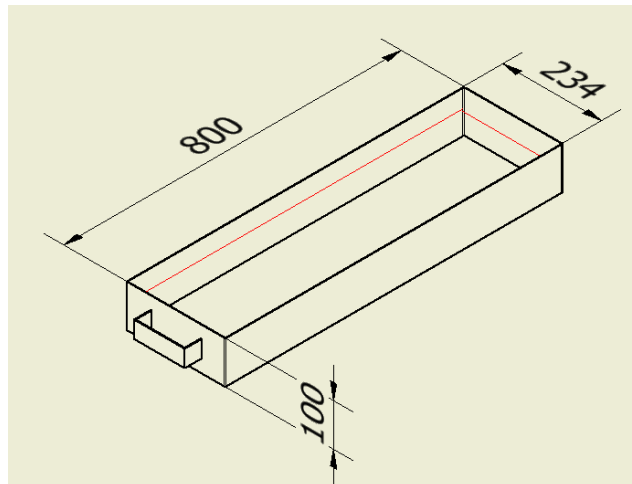


Ilustración 25: Dimensiones bandeja

Finalmente se muestra en una perspectiva isométrica del prototipo, indicando sus dimensiones. En este se muestra un ducto sin la tapa en un extremo, con el motivo de mostrar como es posible retirar la bandeja ya sea vacía o llena. Se puede apreciar también que los ductos por donde circula el aire, también cumplen la función de sostener las bandejas que contienen el material, y para evitar soldaduras, estas se apoyan en las paredes laterales del prototipo, y teniendo en cuenta que estas paredes tienen 50 mm de espesor, es suficiente para que el ducto tenga un buen apoyo en cada extremo.

Por otra parte, la bandeja tiene una menor dimensión que el ducto (en el largo), esto se debe a dos razones, primero a que se debe considerar el espesor de las paredes, donde en un extremo irá una puerta, que además de cumplir la función de sellar la cámara de secado, cumple también la función de ser la entrada del material. Y como segunda razón, es que la bandeja no debe tapar la entrada de aire por un extremo del ducto, el cual consiste en un orificio.

Finalmente, para asegurar que al introducir la bandeja, esta no tope con el extractor de aire ubicado en un extremo, se incluye un tope al final del ducto.

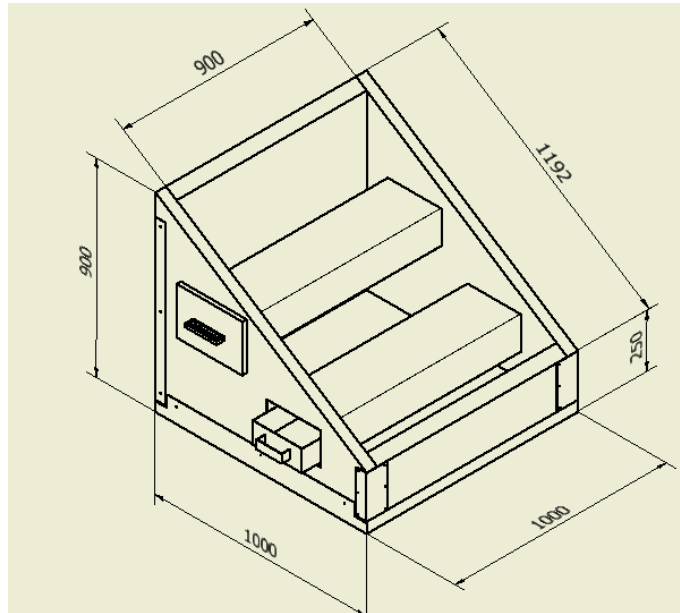


Ilustración 26: Perspectiva isométrica de prototipo

8.8 Modo de uso

El sistema se debe usar de la siguiente forma:

Al llenarse el contenedor ubicado en el baño seco, su contenido debe verterse en la bandeja, siempre tomando precaución de usar elementos seguridad, como guantes.

Para esto es recomendable utilizar como apoyo una pala de mano. Se debe procurar esparcir el material en la bandeja, de tal forma que este quede con una superficie de tendencia plana, y bajo la línea de referencia de 6.5 cm.

Una vez llenada la bandeja y esparcido el material, se debe pesar la bandeja con el material en una balanza. De tal forma de obtener el peso inicial del material a secar de la siguiente forma.

$$W_{oi} = W_{B+M} - W_B$$

Donde:

W_o: Peso del material a secar inicial

$$W_{B+D} = \text{Peso de material} + \text{Bandeja}$$

W_B : *Peso de bandeja*

Ya pesado el material, se debe introducir la bandeja dentro del ducto hasta el tope, el cual se encuentra en un extremo, y luego sellar el ducto con la puerta, procurando que esta quede bien puesta.

Es necesario también que cada 1 o 2 días, se remueva el material al interior de la bandeja con ayuda de un rastrillo de mano, ya que las heces tienen una característica que dificulta el secado, la cual es la formación de una costra en su superficie.

Como se calculó en la sección 8.4, punto 5, la humedad de la mezcla es de 62%. Y es necesario obtener una humedad del 25% eliminando contenido de agua del material. Para saber el peso de material requerido se utiliza la siguiente formula:

$$\frac{0,38 \cdot W_{oi}}{0,75} = W_{of}$$

Donde:

W_{of} = *Peso Final del material (sin bandeja)*

Se considera que las heces tienen un tratamiento completo una vez alcanzado este peso del material. Una vez alcanzado esto, o habiéndose aproximado, también es posible revisar los resultados del instrumento de medición Ibutton dataloger, y verificar el tiempo que las heces fueron sometidas a altas temperaturas y si acaso se encuentran en la zona de seguridad de un tratamiento térmico.

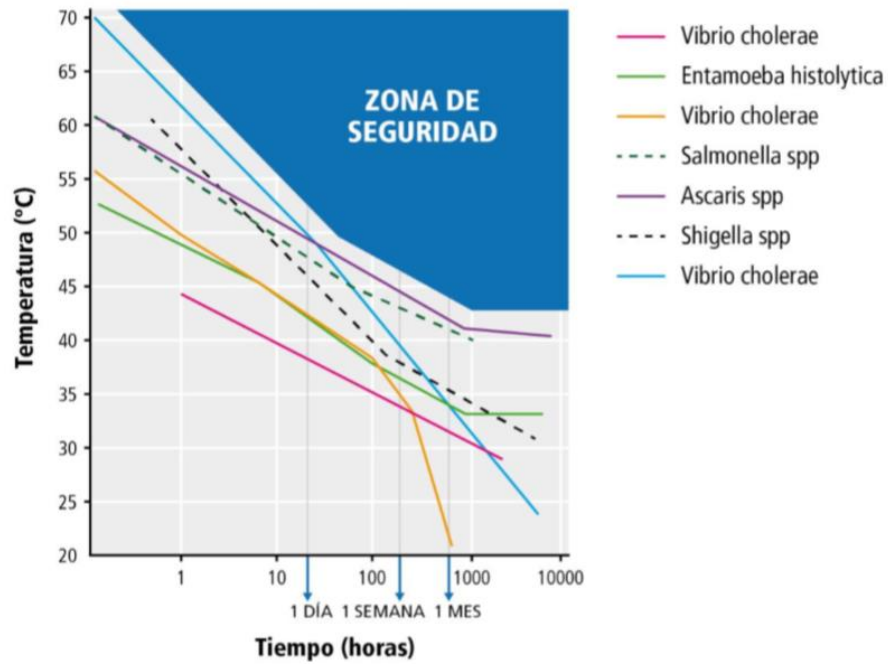


Ilustración 27: zona de seguridad en tratamiento térmico

9. Resultados y estimaciones

9.1 Calor latente de vaporización

Según la ecuación 7.4.4.1 se calcula la energía necesaria para evaporar una cantidad de agua contenida en el material. Teniendo en cuenta que el material se encuentra a 20°C en un inicio.

$$L_w = \frac{R}{M_w} \cdot (p_{s1} - p_{s2} \cdot (T + 273.15))$$

$$L_w = 2249,91 \text{ KJ/kg}$$

Y teniendo en cuenta también que las cámaras de secado tendrán en conjunto aproximadamente 24 kg de material a tratar, de los cuales 14,88 kg son agua. Esto quiere decir que se necesitará adicionar una energía de 33478,66 [KJ].

9.2 Cálculo energía útil

$$Q_u = A_s \cdot G_t(\tau\alpha) - \text{Pérdidas} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)$$

$$A_s = \text{Ancho} \cdot \text{Largo} = 0,85 \cdot 1 = 0,85 \text{ [m}^2\text{]}$$

Tomando en cuenta el mes de enero con azimut hacia el norte e inclinación de 33°.

$$\text{Radiacion mensual} = 614500 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{mes}} \right]$$

$$\text{Radiacion semanal} = 143383 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{semana}} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{Energía entrante semanal} &= A_s \cdot G_t(\tau\alpha) = 0,85 \cdot 143383 \cdot 0,8 \cdot 0,94 \\ &= 91650 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{semana}} \right] \end{aligned}$$

Por lo tanto, para una semana con condiciones apropiadas, si es posible aportar la energía necesaria para eliminar la cantidad de agua solicitada para completar un tratamiento de heces.

9.3 Estimación temperatura de fluido de secado

Para estimar la temperatura de fluido es posible hacerlo mediante un balance de energía en la placa absorbente.

$$S + U_b \cdot (T_a - T_p) + h_2 \cdot (T_f - T_p) + h_r \cdot (T_c - T_p) = 0$$

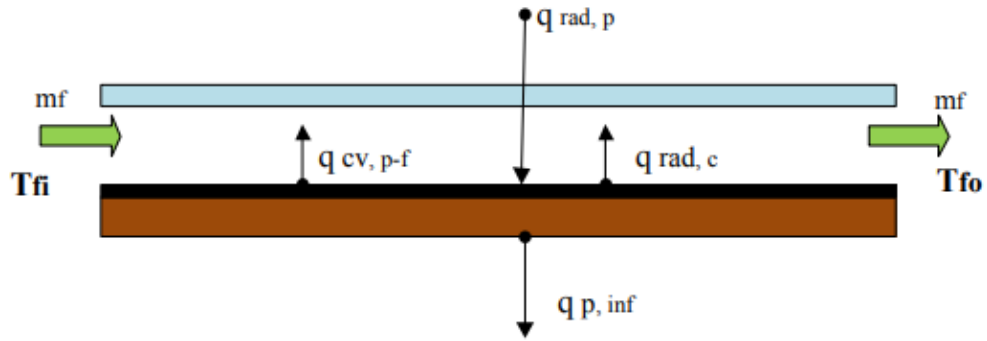


Ilustración 28: balance de energía en placa absorbente.

Estimando la temperatura de placa como 80°C y temperatura ambiente 20°C, y además utilizando datos calculados anteriormente en la sección 8 junto con el gráfico que se muestra a continuación, se obtiene que la temperatura de fluido es de entre 40°C y 50°C.

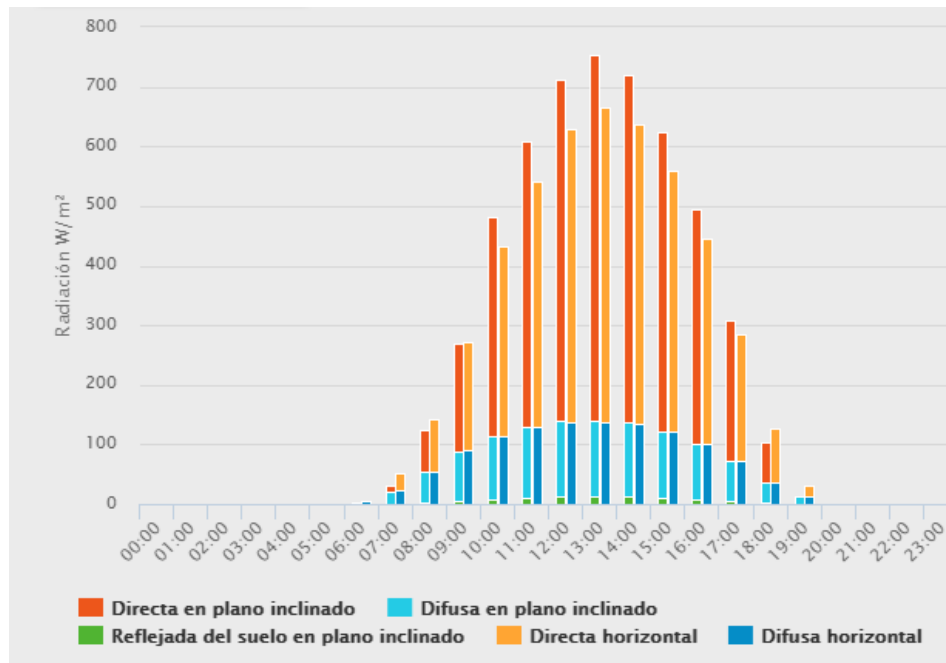


Ilustración 29: Grafico Irradiancia solar [W/m2] en sector de Laguna Verde

9.4 Estimación de tiempo de secado

Al no contar con curvas de comportamiento del material, se utiliza ayuda de una ecuación propuesta por el ingeniero en alimentos Ángeles Martines, en su proyecto de “Diseño y construcción de un secador solar” [23] y el tiempo estimado de secado se calcula de la siguiente forma:

$$t = \frac{x \cdot \rho \cdot L_w \cdot (M_{wb1} - M_{wb2})}{2 \cdot h \cdot \Delta T_{ml}}$$

Donde:

Espesor de la torta a secar: $x = 0,07 \text{ m}$

densidad: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Calor latente de vaporización = $L_w = 2249,91 \text{ KJ/kg}$

Humedad inicial: $M_{wb1} = 0,8 \frac{\text{kgAgua}}{\text{kgMaterial}}$

Humedad final: $M_{wb2} = 0,8 \frac{\text{kgAgua}}{\text{kgMaterial}}$

Coefficiente de transferencia de calor: $h = 4,84 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$

Media logaritmica de temperatura:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(Ta1 - Ti) - (Ta2 - Ti)}{\ln \left(\frac{Ta1 - Ti}{Ta2 - Ti} \right)}$$

Temperatura de bulbo seco a la entrada de secador: $Ta1 = 50^\circ\text{C}$

Temperatura de bulbo seco a la salida de secador: $Ta2 = 35^\circ\text{C}$

Temperatura de bulbo humedo a la entrada de secador: $Ti = 28^\circ\text{C}$

La temperatura de bulbo seco a la entrada fue estimada en la sección 9 y mediante tablas psicométricas se obtuvo la temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo seco a la salida se estima. Obteniendo así un tiempo de 30 horas de secado.

Conclusiones

La conclusión del estudio y diseño del sistema de saneamiento para heces humanas, se divide en distintos puntos:

1. Alternativas de saneamiento:

Si bien la alternativa de saneamiento que resultó elegida y desarrollada fue la alternativa de deshidratación solar, se debe tener en cuenta que en este trabajo se tomó como una prioridad mejorar el tiempo que tarda el tratamiento y el tiempo que se tarda en obtener un producto saneado y reutilizable, por lo tanto, la ponderación de este factor es influyente para su elección.

También se debe tener en cuenta, que al elegir una alternativa de saneamiento, un factor importante es el contexto operacional, y en particular la ubicación, ya que

factores como el clima, coordenada angular donde se encuentre o disponibilidad de recursos. Son factores influyentes en la elección de la alternativa final y/o a la hora de combinar alternativas.

2. Mejoras en el diseño y funcionamiento:

Al construir y probar el prototipo diseñado, fue posible dar cuenta de ciertas mejoras que harán que para próximos diseños se logre un mejor funcionamiento.

- Incorporar filtro de carbono para abatir olores presentes durante el funcionamiento del deshidratador.
- Incorporar mejora de puerta de entrada para bandeja de material.
- Incorporación de rodillo mecánico sin fin para remover el material en su interior y permitir un mejor secado homogéneo.
- Incorporar repelente de polvo y suciedad en el vidrio, de manera que el equipo pueda operar por más tiempo sin interrupción por suciedad (lo cual minimiza la radiación incidente).

3. Mediciones realizadas

Luego de la construcción del prototipo, se realizaron pruebas para verificar y estudiar el comportamiento del equipo, en especial las propiedades del aire en condiciones de alta temperatura. Para esto se utilizaron aparatos llamados Ibutton, los cuales miden temperatura y humedad relativa. Estas mediciones se encuentran enumeradas en el anexo 4.

La medición número 1 y 2, dan cuenta de la capacidad del equipo de aumentar la temperatura del aire, desde una temperatura ambiente de 20 °C en promedio a una temperatura de 50 a 60 °C. Lo cual es un indicador de que el prototipo si cumple con su propósito de aumentar el aire caliente, para luego remover humedad del material forma óptima. También en la medición numero 7 hace una comparación entre 3 días cercanos, de forma de ver como evolucionan las propiedades del aire, no se nota una

diferencia clara ya que los datos rescatados corresponden a cerca de 2 semanas después de haber empezado a deshidratar el producto, y se concluye que es una señal de que el producto se encuentra prácticamente deshidratado y por lo mismo el aire no presenta cambios notorios en sus propiedades.

En la medición numero 3,4,5,6 de temperaturas y humedades de entrada y salida, pasa algo similar que con las anteriores mencionadas, debido a que se han rescatado mediciones pasadas ya 3 semanas aproximadamente del comienzo del deshidratado, no es posible ver un cambio notorio en las propiedades del aire dentro del equipo. Por lo que es posible concluir que el material se encuentra en un estado deshidratado, y es necesario verificar si este se encuentra en este estado. También es posible concluir que a pesar de que el equipo estuvo funcionando en días de alta nubosidad, fue capaz de mantener o aumentar la temperatura respecto al medio ambiente.

4. Futuro de saneamiento ecológico en baños secos y responsabilidad social en un futuro.

Se concluye que este estudio es un aporte al desarrollo de saneamiento por medio de soluciones alternativas. Existen diversas alternativas de saneamiento, y no es posible decir de forma definitiva cual es mejor o peor, si se puede identificar cual es la alternativa mas efectiva de acuerdo al contexto operacional. Para continuar con estas iniciativas y desarrollo de nuevas tecnologías, es importante crear conciencia de responsabilidad medio ambiental en las personas, para esto se debe hacer difusión de estas alternativas de saneamiento y a la vez complementar con información de las consecuencias que tiene el echo de no incorporar un sistema de saneamiento para este tipo de residuos.

Se espera que en un futuro se incorporen este tipo de tecnologías en sectores que no cumplan con condiciones optimas de manejo de residuos, que sean mayormente

aceptadas por los usuarios, que se potencie la responsabilidad del ser humano frente al cuidado de los recursos del medio ambiente y aumente la calidad de vida de las personas.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de tecnología industrial. , «Sistemas de saneamiento seco,» Buenos Aires, 2016.
- [2] Organización mundial de la salud OMS, Guidelines for safe use of wastewater, Vol. 1-4, 2006.
- [3] Joseph Jenkins, HUMANURE HANDBOOK, Chelsea Green Publishing, 2005.
- [4] Schönning & Stenström, «Lineamientos para el Uso Seguro de la Orina y de las

- Heces en Sistemas de Saneamiento Ecológico,» Stockholm, 2004.
- [5] R.Mercado, «Blastocistosis: enteroparasitosis más frecuente en Chile,» Santiago, Chile, 2004.
- [6] Ortigoza, S.Hernandez, M.Castañeda, M.Castro., «Medio de cultivo alterno para el diagnostico de Blastocystis hominis.,» 2011.
- [7] División de normas del Instituto Nacional de Norma, «NCh 2880.Of2004: Compost - Clasificación y requisitos,» Santiago, Chile, 2004.
- [8] Minsegrepes, «Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas,» Santiago, Chile, 2009.
- [9] Bethony, J., Brooker, S., Albonico, M., Geiger, S., «Soil-transmitted helminth infections: ascariasis, trichuriasis, and hookworm.,» 2006.
- [10] Rieck, C., von Münch, E., Hoffmann, H. , «Technology Review of Urine-Diverting Dry Toilets (UDDTs): Overview of design, operation, management and cost,» 2012.
- [11] Ministerio de Medio Ambiente, MMA. , Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos, Malaga España., 2011.
- [12] Astro y ciencia, «www.astroyciencia.com,» [En línea].
- [13] Ministerio de hacienda, Ley 20.365, Norma Técnica que determina algoritmo para la verificación de la contribución solar mínima de los Sistemas Solares.
- [14] Dpto de Física Aplicada a los recursos naturales, «DISEÑO DE CAPTADOR

SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO,» Paraguay, 2012.

- [15] R. Corvalan, M. Horn, R. Roman y L. Saravia, Ingeniería del secado solar, 1995.
- [16] S. Giner y M. Gely, Sorptional Parameters of Sunflower Seeds of Use in Drying and Storage Stability Studies, 2005.
- [17] O.V.Ekechukwu, Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory, 1999.
- [18] Ministerio de obras y urbanismo, Manual de sistemas solares termicos, 2014.
- [19] UTFSM, CNE, PNUD, Irradiancia solar en territorios de la república de Chile, Santiago, 2008.
- [20] P. Sarmiento, Energía solar en arquitectura y construcción, Santiago, 2007.
- [21] Eautarcie. [En línea]. Available: <https://www.eautarcie.org/es/05e.html>.
- [22] ICE, «Diseño de biodigestores y producción».
- [23] Angeles Martines, «“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR"».
- [24] MINSAL, «Informe de Situación Cólera,» Santiago, 2013.
- [25] Kneule, F., El secado, Bilbao: Urmo, S.A. de Ediciones, 1982.

Anexos

1. Anexo 1: Materiales de construcción

1.1 Panel Aislado

Se utiliza con la finalidad de aislar y acumular la energía obtenida dentro del prototipo.

Tabla 32: Características de panel aislado

Cara Superior Bandeja Acero	Zinc-Alum	Espesor 0,5mm.
Aislación Poliuretano	50mm. Espesor	Densidad 40Kg/m³ (+/-5%)
Cara Inferior Bandeja Acero	Zinc-Alum	Espesor 0,5mm.

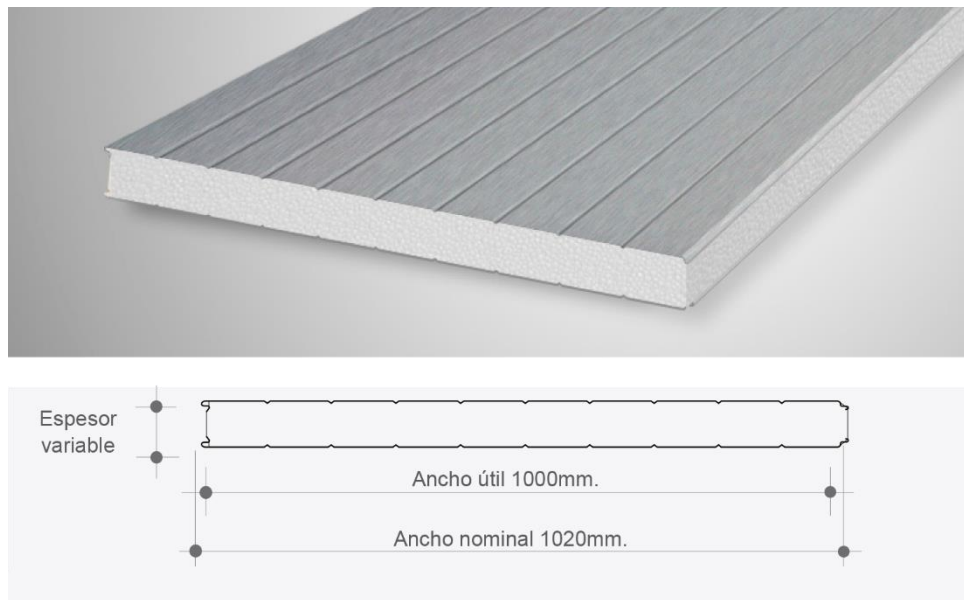


Ilustración 30: Dimensiones panel aislado

El panel aislado es de una dimensión de 1x3.1 m. y se corta de la siguiente forma para el aprovechamiento de material.

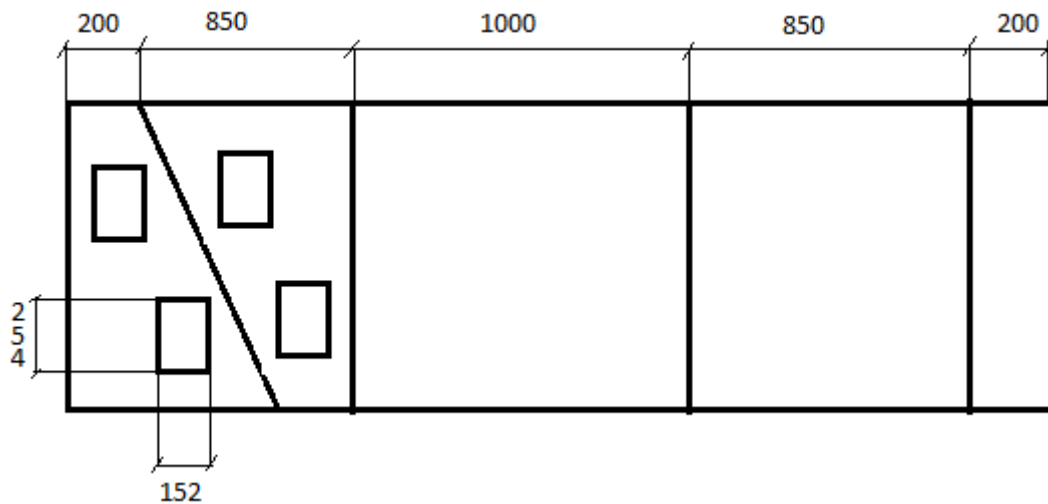


Ilustración 31: Cortes de panel aislado

1.2 Bandejas

Compartimento donde se depositan las heces para su posterior secado.

Dimensiones: 23x10x80 cm, acero galvanizado.



Ilustración 32: Bandeja

1.3 Ductos

Cumplen la finalidad de ser el conducto por donde circula el aire a alta temperatura hasta la expulsión por uno de sus extremos.

Dimensiones: 15,2x25.4x100 cm, acero galvanizado.



Ilustración 33: Ducto

1.4 Ventana termo panel

Características: ventana con doble vidrio de dimensiones 88x105 cm, espesor de vidrio de 7 mm y espaciado de 8 mm, marco de aluminio.



Ilustración 34: Ventana termo panel

1.5 Canal U metalcon

Dimensiones: 60x20x3m



Ilustración 35: Perfil Canal

1.6 Uniones de escuadra:

Dimensiones: Perfil ángulo refuerzo 4 3/8 x 1 1/2 a 44 Simpson



Ilustración 36: Uniones de escuadra

1.7 Remaches

Dimensiones: Remache tipo pop 4 x 10" 100 unidades Importper



Ilustración 37: Remache tipo Pop

1.8 Pernos

Dimensiones: Perno 3/16x3 con tuerca



Ilustración 38: Pernos

1.9 Extractor solar

Características: Tamaño: Fan: 15 x 11 x 5.5 cm, velocidad: 0,65 m/s



Ilustración 39: Extractor Solar

1.10 Pintura negra

Características: Anticorrosivo opaco 1/4 gl NegroTricolor



Ilustración 40: Pintura anticorrosiva negro opaco

1.11 Silicona de alta temperatura

Características: Podrá ser utilizado para ensamblar toda superficie que esté sometida, incluso, a altas temperaturas de hasta 285°C



Ilustración 41: Silicona de alta temperatura

1.12 Espuma poliuretano

Características: Cuenta con un cabezal que se puede adaptar una pistola de aplicación o una boquilla plástica. Excelente para el llenado y sellado con capacidad de montaje, alta temperatura y aislamiento acústico. Es fabricado a prueba de hongos, resistente al calor y frío (-60C y +100C), resistente a la humedad.



Ilustración 42: Espuma Poliuretano expansiva

1.13 Burletes y Gomas

Burlete: consiste en una cinta adhesiva que se instala en los bordes de puertas y ventanas, para cubrir filtraciones y así proteger la habitación del frío, humedad y polvo exterior. Fabricado en polipropileno, tiene adhesivo incorporado, lo que lo hace fácil de instalar.



Ilustración 43: Burletes de goma

1.14 Manilla y madera



Ilustración 44: Manilla y madera

2. Anexo 2: Costos de materiales para prototipo

Tabla 33: Costos de construcción de prototipo

Costos	Cantidad	Unidad	Valor unitario	Total
Instapannel	3,1	Metros	\$ 29.236	\$ 90.631
Bandejas acero galvanizado	2	unidades	\$ 14.000	\$ 28.000
Ductos acero galvanizado	2	unidades	\$ 8.500	\$ 17.000
Ventana termo panel	1	unidades	\$ 95.000	\$ 95.000
Perfil U Metalcon	12	Metros	\$ 417	\$ 5.000
Uniones de escuadra	12	unidades	\$ 4.088	\$ 49.060
Remaches	2	cajas	\$ 1.600	\$ 3.200
Pernos	1	cajas	\$ 4.000	\$ 4.000
Extractor solar	2	unidades	\$ 6.990	\$ 13.980
Cable de corriente	2	metros	\$ 150	\$ 300
Pintura negra	0,25	galón	\$ 26.360	\$ 6.590
Silicona de Alta Temperatura	1	unidades	\$ 6.990	\$ 6.990
Espuma poliuretano	2	unidades	\$ 4.500	\$ 9.000
Perfil C	4	Metros	\$ 965	\$ 3.860
Goma	8	Metros	\$ 988	\$ 7.900
Burletes	1	cajas	\$ 6.290	\$ 6.290
Manillas	2	unidades	\$ 500	\$ 1.000
Madera	1	Metros	\$ 600	\$ 600
Pegamento	1	unidades	\$ 2.000	\$ 2.000
TOTAL				\$ 350.401

3. Anexo 3: Prototipo Construido



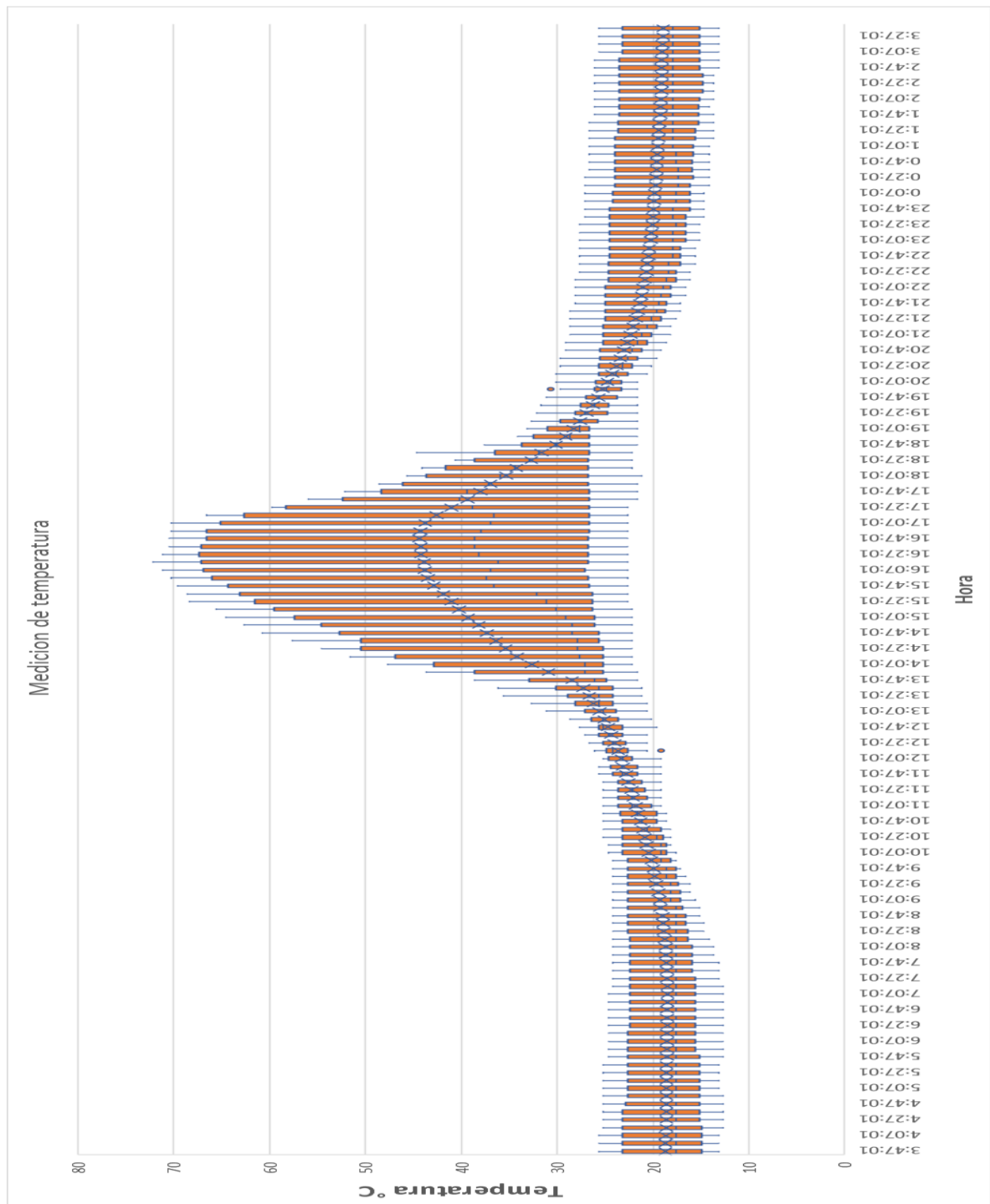
Ilustración 45: Prototipo construido, extremo de puertas



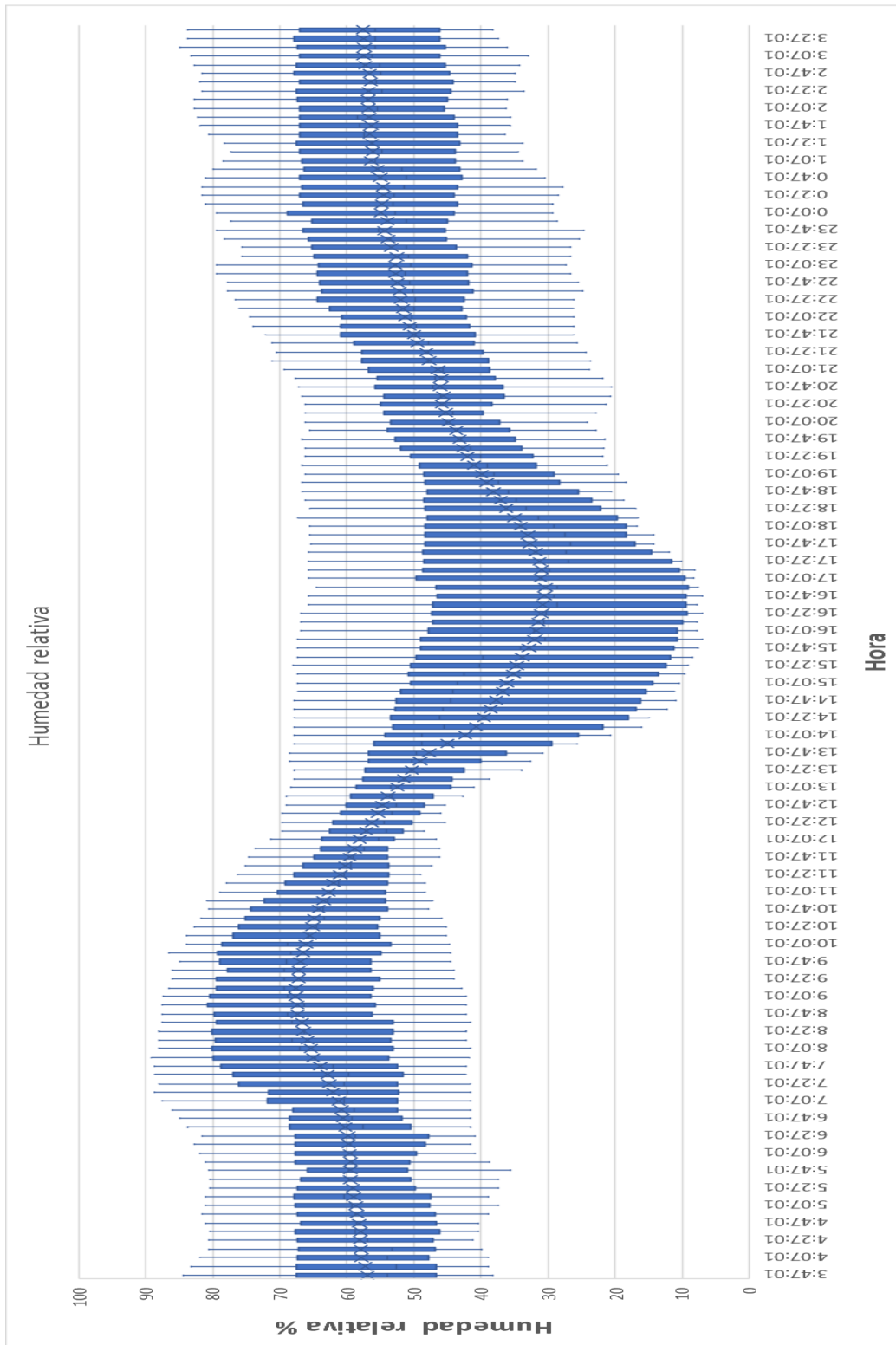
Ilustración 46: Prototipo construido, extremo extractores

4. Anexo 4: Mediciones y gráficos

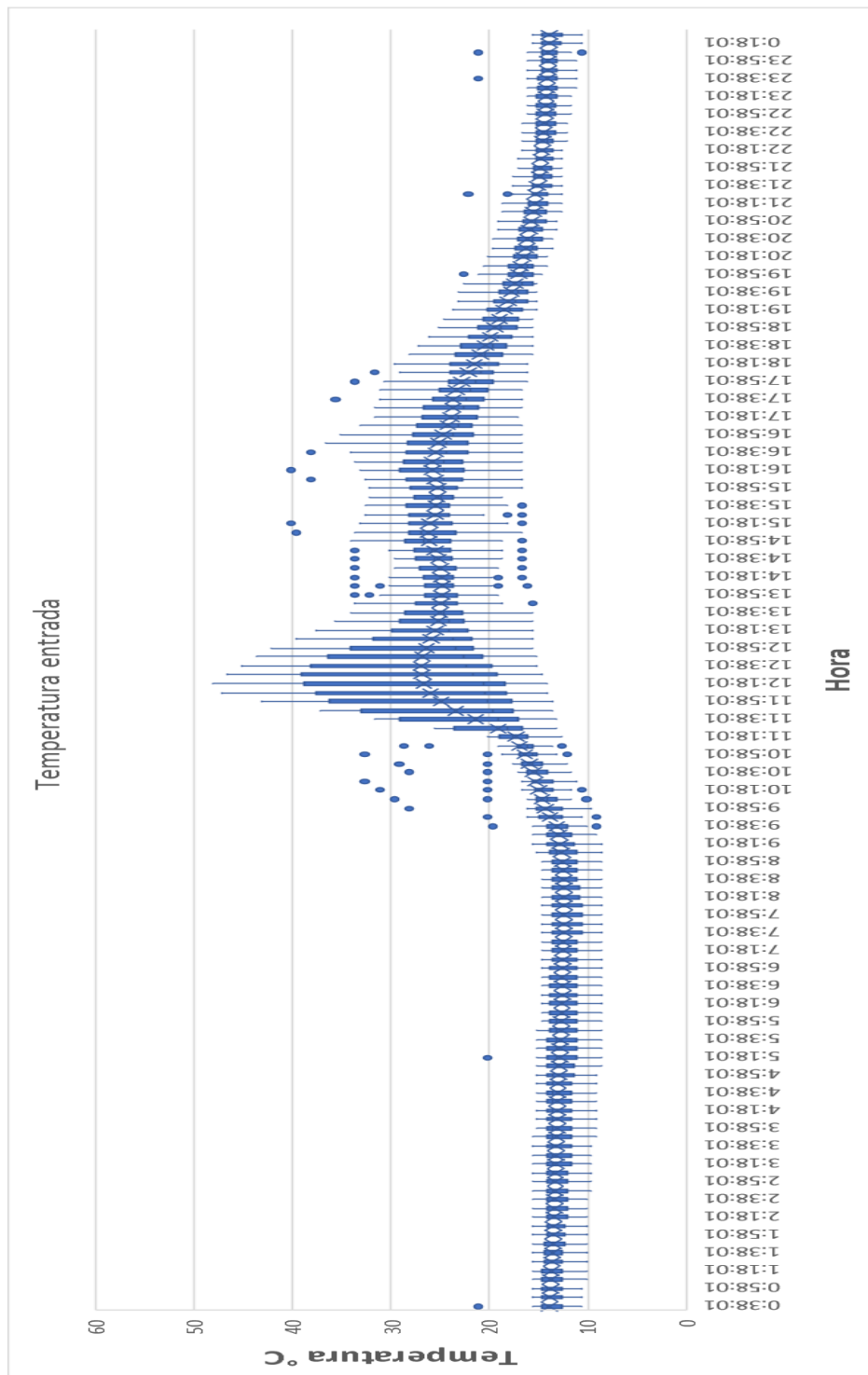
1. Medición de temperatura desde 01-02-2019 hasta 01-03-2019. Ducto salida.



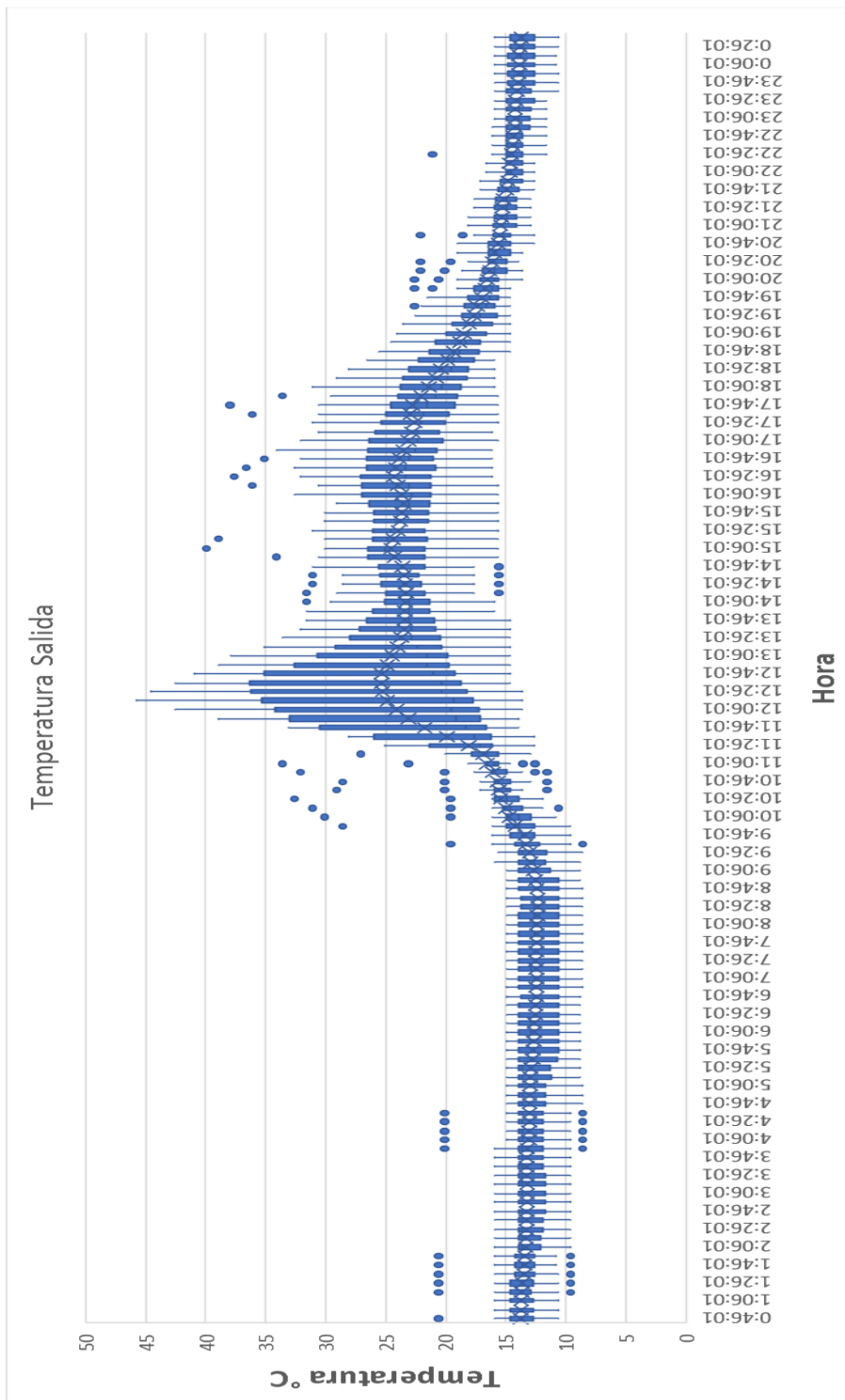
2. Medición de humedad desde 01-02-2019 hasta 01-03-2019. Ducto salida.



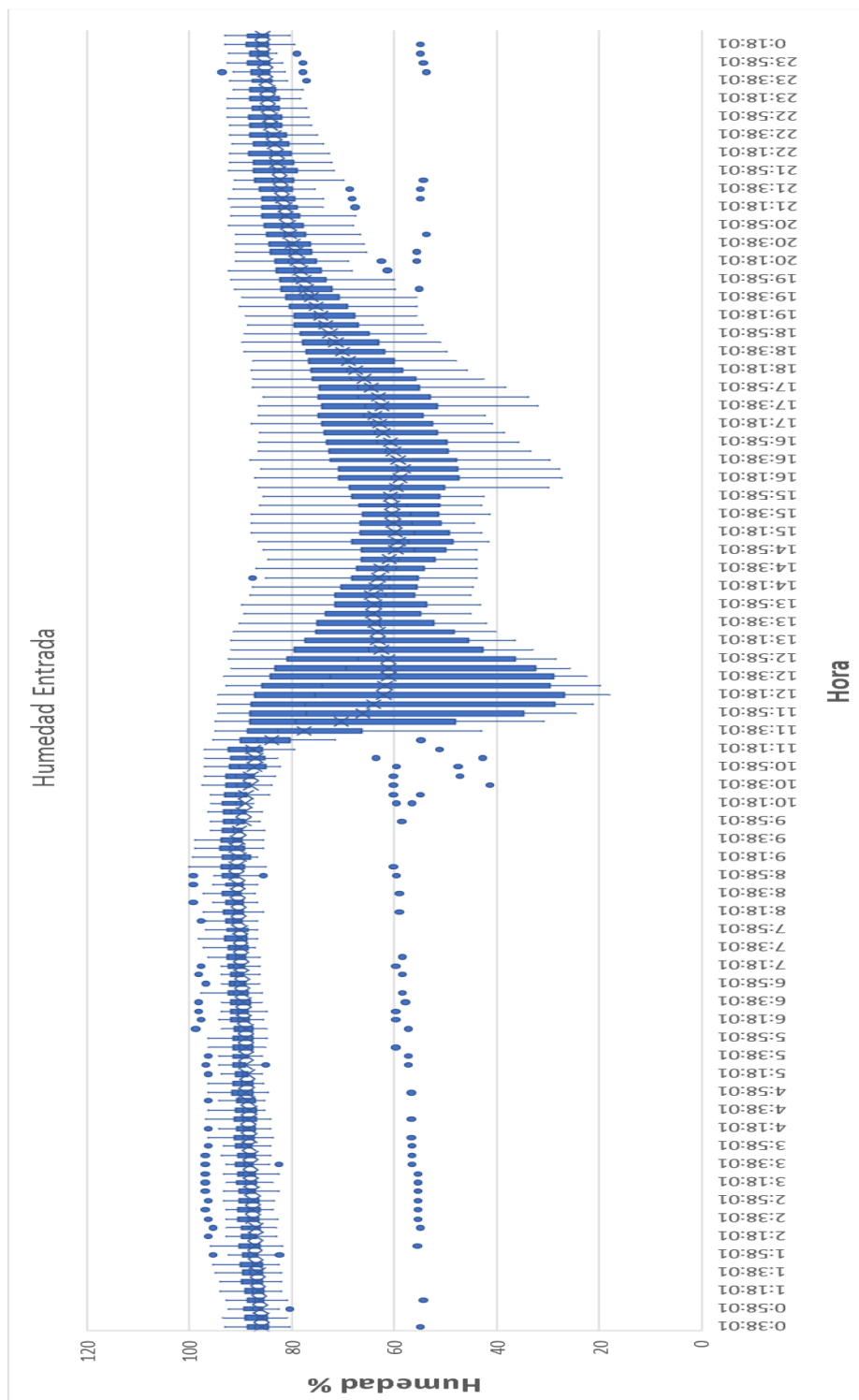
3. Medición de temperatura desde 29-03-2019 hasta 23-04-2019. Ducto entrada.



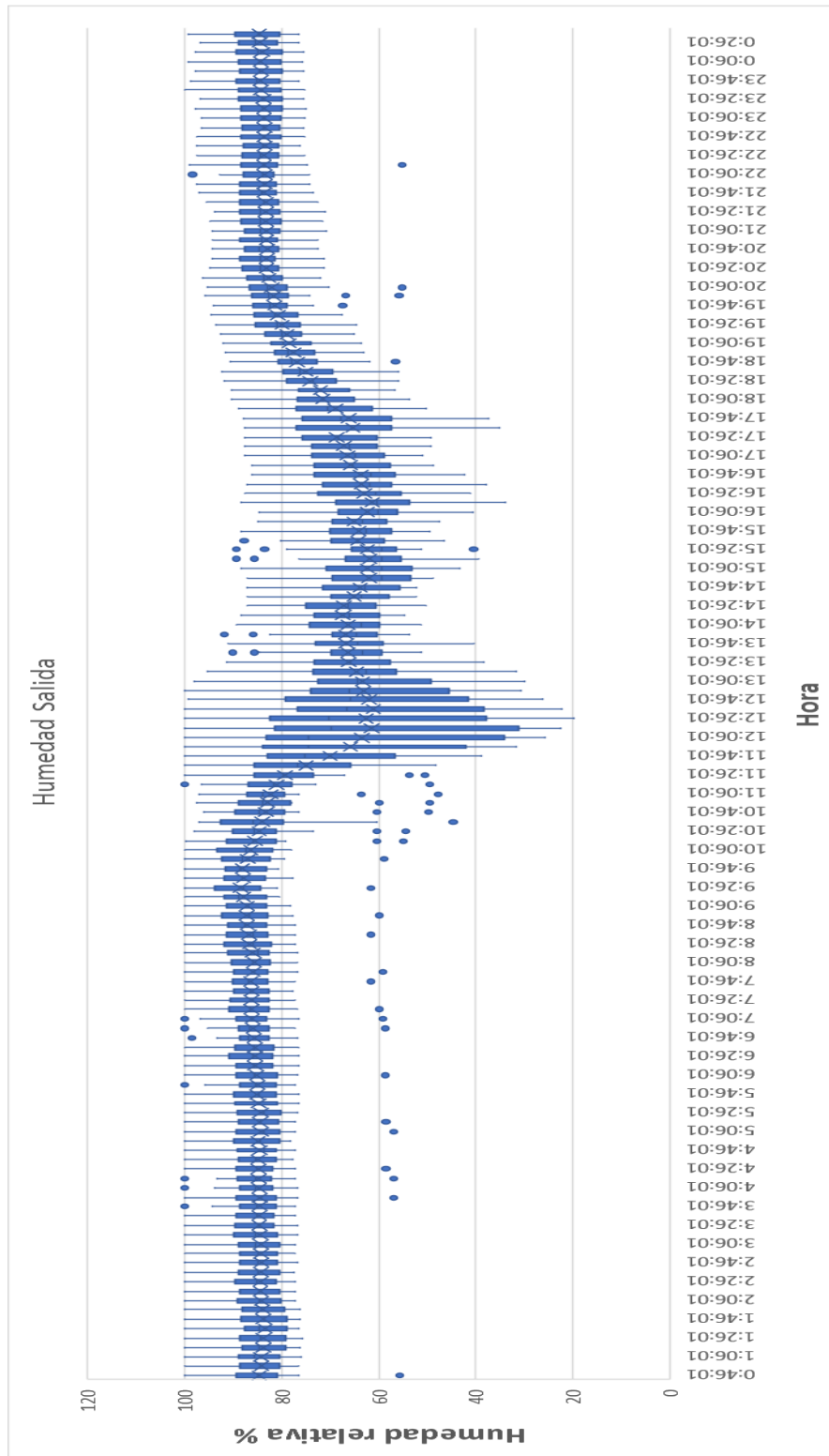
4. Medición de temperatura desde 29-03-2019 hasta 23-04-2019. Ducto salida.



5. Medición de humedad desde 29-03-2019 hasta 23-04-2019. Ducto entrada.



6. Medición de humedad desde 29-03-2019 hasta 23-04-2019. Ducto Salida.



7. Medición de humedad y temperatura. Ducto salida.

