

Universidad del Valle de Guatemala  
Facultad de Ingeniería



**Evaluación de las posibles aplicaciones de la fibra de palma  
africana, a nivel laboratorio.**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Natalia Quirin para optar al  
grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2024



Universidad del Valle de Guatemala  
Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

**Evaluación de las posibles aplicaciones de la fibra de palma  
africana, a nivel laboratorio.**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Natalia Quirin para optar al  
grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2024

Vo. Bo.

(f) 

Ing. Luis Ernesto Núñez González


Terna examinadora

(f) 

Ing. Luis Ernesto Núñez González

(f) 

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 

Ing. José Andrés Lam Ceballos

Fecha de aprobación: Guatemala, 11 de diciembre de 2024

## PREFACIO

Este trabajo tiene como finalidad evaluar las posibles aplicaciones de la fibra de palma africana, un recurso natural que ha sido poco explorado en la literatura científica, pero que en Guatemala es un monocultivo en crecimiento exponencial. Mi motivación para llevar a cabo esta investigación surge del creciente interés por encontrar soluciones sostenibles que reduzcan el impacto ambiental del desecho de esta fibra luego de su utilización en la industria.

Durante el desarrollo de este proyecto, me enfrenté a varios retos, desde la investigación exploratoria hasta la realización de pruebas experimentales en el laboratorio. Sin embargo, cada obstáculo me ayudó a aprender y mejorar la capacidad de enfrentar problemas imprevistos. Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de varias personas a quienes me gustaría agradecer. Primero, quisiera agradecerle al Ingeniero Luis Núñez por su orientación y consejos a lo largo de esta investigación. Por otro lado, también quiero agradecer al Ingeniero Gamaliel Zambrano por su apoyo en conseguir la materia prima de la investigación además por su orientación y apoyo durante la carrera. También quiero agradecer, a mi familia y amigos, por su constante apoyo emocional y motivación durante estos años de carrera. Por último, quisiera agradecer al Ingeniero Orlando Schoenstedt por su introducción al tema de cemento celular.

Espero que este estudio contribuya al desarrollo de nuevas investigaciones sobre el uso de recursos naturales que no tienen un segundo uso y que inspire a otros a explorar alternativas ecológicas que beneficien tanto al medio ambiente como a la sociedad.

## ÍNDICE

PREFACIO .....	i
LISTA DE TABLAS .....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE ECUACIONES.....	ii
RESUMEN.....	ii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS.....	3
A. Objetivo general: .....	3
B. Objetivos específicos:.....	3
IV. MARCO TEÓRICO .....	4
A. Palma africana.....	4
1. Palma africana en Guatemala .....	5
2. Impacto social y ambiental .....	6
3. Beneficios económicos.....	7
B. Fibra de palma africana .....	9
C. Biopolímeros.....	10
D. Biomasa .....	10
1. Combustión de biomasa en calderas.....	11
2. Tipos de calderas de biomasa .....	12
3. Ventajas de la combustión de biomasa .....	13
4. Poder calorífico.....	13
5. Calor latente .....	14
6. Bomba calorimétrica.....	15
E. Concreto .....	16
1. Propiedades del concreto .....	17
2. Hidratación y curado del cemento.....	18
3. Compresión a la resistencia.....	19
F. Celulosa.....	20
G. Agregados de celulosa al cemento .....	21
H. Trituración.....	22

1. Molinos.....	22
I. Tamizaje.....	23
1. Tipos de tamizadores .....	24
2. Granulometría de agregados .....	26
3. Agregado fino.....	27
4. Módulo de finura.....	27
5. Tamaño máximo .....	28
6. Curva granulométrica.....	28
J. ASTM.....	28
1. ASTM C33.....	29
4.8.2 Normas COGUANOR provenientes de la ASTM C33 .....	29
2. Norma COGUANOR NTG 41063 .....	30
3. Norma ACI 523.3R-14.....	30
K. Celulosa aplicada en construcción.....	31
L. Fibras de celulosa.....	33
1. Liguina .....	34
2. Hemicelulosa .....	35
M. Métodos de obtención de celulosa .....	35
1. Rendimiento del método a la sosa.....	37
2. Aplicaciones de fibras manufacturadas.....	37
N. Espectroscopia Infrarroja .....	38
O. Azul de metileno .....	38
1. Absorbancia del azul de metileno por la celulosa .....	39
P. Absorbancia .....	40
1. Tipos de espectrofotómetros .....	40
V. ANTECEDENTES .....	42
VI. METODOLOGÍA .....	47
A. Preparación de la muestra inicial (trituration y tamizado): .....	47
B. Determinación de la humedad inicial de la muestra: .....	47
C. Determinación del contenido de cenizas de la muestra:.....	48
D. Determinación de la capacidad calorífica de la muestra.....	48
E. Fabricación de morteros:.....	50
F. Pruebas de comprensión a la resistencia: .....	51
G. Prueba de densidad en seco .....	51
H. Obtención de la fibra de celulosa: .....	51

VII. RESULTADOS .....	54
VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	59
IX. CONCLUSIONES .....	65
X. RECOMENDACIONES .....	66
XI. BIBLIOGRAFÍA .....	67
XII. ANEXOS .....	72
A. Datos originales .....	72
B. Cálculo de muestra .....	75
C. Análisis de error .....	77
D. Datos calculados .....	78
E. Evidencias .....	83
XIII. GLOSARIO .....	89

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Propiedades de combustión para biomasa de fibra de palma .....	54
<b>Tabla 2:</b> Comparación del poder calorífico de la fibra de palma con biocombustibles sólidos .....	54
<b>Tabla 3:</b> Comparación del poder calorífico de la fibra de palma con biocombustibles líquidos.....	54
<b>Tabla 4:</b> Propiedades del agregado de cemento fibra de palma .....	54
<b>Tabla 5:</b> Pruebas de compresión a la resistencia de la mezcla de cemento celular con una densidad de 956 kg/m <sup>3</sup> con agregado fino de fibra de palma africana.....	55
<b>Tabla 6:</b> Comparación del cemento celular de fibra de palma y arena pómez.....	55
<b>Tabla 7:</b> Rendimiento de la celulosa en la fibra de palma africana .....	55
<b>Tabla 8:</b> Resultados de la espectroscopia infrarrojo de la fibra de celulosa .....	56
<b>Tabla 9:</b> Prueba de absorbancia de azul de metileno por fibras de celulosa .....	57
<b>Tabla 10:</b> Operaciones unitarias de cada aplicación propuesta .....	58
<b>Tabla 11:</b> Datos originales de la caracterización de la fibra de palma .....	72
<b>Tabla 12:</b> Datos originales de trituración.....	72
<b>Tabla 13:</b> Datos originales del tamizaje.....	72
<b>Tabla 14:</b> Datos originales de la biomasa utilizada para la prueba en la bomba calorimétrica.....	73
<b>Tabla 15:</b> Datos originales de la formulación del cemento celular .....	73
<b>Tabla 16:</b> Datos originales de la resistencia del cemento celular de la fibra de palma.....	74
<b>Tabla 17:</b> Datos originales de la producción de fibra de celulosa de la palma .....	74
<b>Tabla 18:</b> Datos originales de la prueba de absorbancia del azul de metileno por la fibra de celulosa.....	74
<b>Tabla 19:</b> Datos originales de la utilización de la biomasa total utilizada por aplicación .....	74
<b>Tabla 20:</b> Datos estadísticos de la caracterización de la fibra de palma .....	78
<b>Tabla 21:</b> Datos estadísticos de la biomasa utilizada para la prueba en la bomba calorimétrica .....	78
<b>Tabla 22:</b> Datos estadísticos de la formulación del cemento celular .....	78
<b>Tabla 23:</b> Datos estadísticos de los resultados de las pruebas de resistencia del cemento celular .....	78
<b>Tabla 24:</b> Datos estadísticos de la obtención de fibra de celulosa .....	79
<b>Tabla 25:</b> Análisis granulométrico de la tamizada de fibra de palma.....	79
<b>Tabla 26:</b> Comparación con la norma COGUANOR NTG 41063.....	80
<b>Tabla 27:</b> Eficiencia de la molienda de la fibra de palma.....	80
<b>Tabla 28:</b> Eficiencia energética de la molienda .....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principales productores de aceite de palma a nivel mundial a diciembre del 2023 en toneladas métricas .....	4
Figura 2: Ubicación del cultivo de palma africana en Guatemala .....	5
Figura 3: Porcentaje del bosque desaparecido en el mundo por la palma africana.....	6
Figura 4: Cinco plantaciones con mayor deforestación de América Latina .....	7
Figura 5: Ranking de exportaciones del Guatemala para el 2017 .....	8
Figura 6: Mapa del PIB de la palma de aceite por departamento .....	9
Figura 7: Clasificación de los biopolímeros .....	10
Figura 8: Clasificación de la biomasa .....	11
Figura 9: Funcionamiento de una caldera de biomasa.....	12
Figura 10: Tipos de combustible en caldera de biomasa.....	13
Figura 11: Diferencia entre poder calorífico superior e inferior.....	14
Figura 12: Tipos de calor latente del agua.....	15
Figura 13: Bomba calorimétrica y sus partes .....	16
Figura 14: Materiales componentes del concreto .....	17
Figura 15: Estados del concreto.....	18
Figura 16: Distintos tipos de máquina de resistencia a la compresión .....	20
Figura 17: Estructura de la celulosa .....	21
Figura 18: Tipos de molinos.....	23
Figura 19: Tamiz giratorio .....	25
Figura 20: Tamiz vibratorio .....	25
Figura 21: Tamiz centrifugo.....	26
Figura 22: Requisitos de granulometría de la Organización Internacional de Normalización (ISO) para el agregado fino, regido por la ASTM C33 .....	27
Figura 23: Ecuación de módulo de finura.....	27
Figura 24: Parámetros de módulo de finura.....	28
Figura 25: Ejemplo de una curva granulométrica .....	28
Figura 26: Parámetros del ACI 523.3R-14 para la resistencia a la compresión típica para cemento celular .....	31
Figura 27: Clasificación de los concretos ligeros .....	33
Figura 28: Tipos de monolignoles más comunes encontrados en los bloques de construcción de la liguina (a) y otro tipos de monolignoles (b).....	34
Figura 29: Estructura molecular de la celulosa (a) comparado la hemicelulosa (b) .....	35
Figura 30: Mecanismo de reacción del método a la sosa de obtención de celulosa .....	36
Figura 31: Ecuación de rendimiento celular .....	37
Figura 32: Partes de la espectrofotómetro infrarrojo (IR) .....	38
Figura 33: Estructura del azul de metileno .....	39
Figura 34: Propiedades de azul de metileno .....	39
Figura 35: Partes de un espectrofotómetro .....	41
Figura 36: Mezclas distintas con su resistencia y densidad respectiva de la piedra pómez .....	43

Figura 37: Análisis granulométrico de la piedra pómez .....	43
Figura 38: Granulometría de la piedra pómez.....	44
Figura 39: Aplicaciones del cemento según su densidad .....	44
Figura 40: Clasificación de concreto dependiendo de su densidad.....	45
Figura 41: Espectroscopia infrarroja de la paja de caña luego de tratarla con el método a la sosa .....	46
Figura 42: Espectroscopia infrarrojo de la pureza de la fibra celulosa de la palma africana .....	56
Figura 43: Estructura de la celulosa con tinte de azul de metileno .....	57
Figura 44: Prueba de absorbancia de azul de metileno por las fibras de celulosa .....	57
Figura 45: Comparación de color azul de metileno en fibras de celulosa.....	58
Figura 46: Gráfica de distribución de tamaño de la fibra de palma .....	81
Figura 47: Diagrama de flujo de la trituración de la biomasa .....	81
Figura 48: Balance de masa de la prueba en la bomba calorimétrica.....	82
Figura 49: Balance de masa de la producción de los morteros de cemento celular .....	82
Figura 50: Balance de masa de la obtención de fibra celular.....	82
Figura 51: Muestra inicial de fibra de palma antes de ser triturada .....	83
Figura 52: Porcentaje de humedad inicial de la fibra de palma obtenido por medio de la balanza de humedad.....	83
Figura 53: Prueba de la capacidad calorífica por medio de la bomba calorimétrica IKA .....	84
Figura 54: Peso de muestra de la bomba calorimétrica .....	84
Figura 55: Peso de un plato de tamizado .....	85
Figura 56: Producción de cemento celular .....	85
Figura 57: Cemento celular formulado en morteros.....	86
Figura 58: Morteros de cemento celular luego de desmoldar .....	86
Figura 59: Fraguado de cemento celular .....	87
Figura 60: Método a la sosa para obtención de celulosa.....	87
Figura 61: Fibras de celulosa luego del método a la sosa .....	88

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Cálculo de la masa retenida en cada uno de los platos de tamizaje.....	75
Ecuación 2: Cálculo del porcentaje de masa retenida en cada uno de los platos .....	75
Ecuación 3: Cálculo del porcentaje de masa que pasa al siguiente plato .....	75
Ecuación 4: Cálculo del porcentaje retenido acumulado .....	75
Ecuación 5: Cálculo del módulo de fineza .....	76
Ecuación 6: Cálculo del flujo másico del molino.....	76
Ecuación 7: Cálculo de eficiencia másica de la molienda. ....	76
Ecuación 8: Cálculo de la potencia de trituración del molino.....	76
Ecuación 9: Cálculo de la energía real de trituración del molino.....	77
Ecuación 10: Cálculo de eficiencia energética de la molienda .....	77

## RESUMEN

Con el propósito de evaluar las posibles aplicaciones de la fibra de palma africana a nivel de laboratorio, dada la escasez de información sobre su uso, se propusieron tres aplicaciones. Estas fueron: como fuente de energía mediante su combustión, como agregado en la producción de cemento celular, y para la extracción de fibras de celulosa. En primer lugar, se determinó que la fibra tiene un poder calorífico de 16.32 MJ/kg, lo que la hace comparable a otras biomásas, como la madera y el bagazo. Además, mostró un bajo contenido de cenizas siendo del 3.34% y una humedad del 10.55%. En segundo lugar, se probó la fibra como agregado para la producción de cemento celular, obteniendo resultados positivos. El módulo de finura de la fibra 3.4 fue comparable al de otros agregados, como la piedra pómez, comúnmente utilizada en este tipo de cemento. Se cumplieron las normas de calidad COGUANOR NTG 41063 y ACI 523.3R-14, logrando una resistencia a la compresión de  $268 \pm 36.01$  psi, suficiente para aplicaciones en prefabricados no portantes y aislamiento térmico. Por último, se extrajeron fibras de celulosa mediante un método alcalino modificado, obteniendo un rendimiento del 65%, superior a otras biomásas como el bagazo de caña del 40%. El análisis en el espectro infrarrojo y microscópico confirmó la pureza de la celulosa extraída, lo que demuestra el potencial de la fibra de palma africana como una fuente viable de celulosa para aplicaciones industriales. Estos resultados indican que la fibra de palma africana tiene un gran potencial tanto como fuente de energía renovable como en la industria de materiales de construcción y celulosa. Los resultados finales justifican su consideración como alternativas viables para la utilización de este recurso.

## I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento exponencial de la industria de la palma africana ha llevado a un incremento significativo en la generación de desechos de fibra de palma. Estos subproductos que pueden ser considerados residuos, poseen un potencial sin explotar en diversas áreas de aplicación. Esta tesis propone evaluar tres posibles aplicaciones de los desechos de fibra de palma africana en la industria a nivel laboratorio.

Como primera aplicación, se propone evaluar cómo biocombustible. En la actualidad la demanda de energía sigue en aumento y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es cada vez más crucial para la sostenibilidad del planeta. Por lo que la búsqueda de fuentes de energía renovable y sostenible se ha convertido en una prioridad global. Por lo que la fibra de palma africana es un recurso abundante y prometedor para la generación de energía. Esta tesis se centra en explorar la aplicación de la fibra de palma africana como biomasa para la producción de energía, por medio del análisis de contenido de cenizas, humedad y su poder calorífico para poder evaluar su potencial aplicación en la industria y compararlo con otras fuentes ya utilizadas.

Por otro lado, también está la industria de la construcción, la cual enfrenta constantes desafíos en su búsqueda por materiales más sostenibles y eficientes. La fibra de palma africana tiene un potencial prometedor como agregado en la producción de cemento. Esta tesis propone investigar las diversas aplicaciones de la fibra de palma africana como agregado en la fabricación del cemento, analizando su impacto en las propiedades mecánicas del material, por medio de un análisis de compresión a la resistencia de morteros. Al profundizar en esta área poco explorada, se espera ofrecer nuevas propuestas innovadoras para la producción de materiales de construcción más sostenibles con el medio ambiente.

Por último, se propone extraer la fibra de celulosa de la palma, ya que se puede obtener y utilizar en distintos procesos. Por medio de un método artesanal para obtener una fibra más pura para que pueda ser utilizada en distintas aplicaciones. Estos son utilizados en la construcción como un aditivo, fuente de fibra dietética, materia prima para la industria papelera y aplicaciones farmacéuticas. Por lo que se desea conocer el rendimiento celular de la fibra de palma, para comparar con otros residuos celulósicos y concluir si es un método efectivo.

## II. JUSTIFICACIÓN

Baldrian y Valáskóva (2008) definieron los residuos agrícolas como fuentes forestales e industriales que son en su mayoría biomasa lignocelulósica y representan la mayor cantidad de carbono renovable en el suelo. Estos materiales orgánicos presentan inconvenientes para el medio ambiente, ya que ocupan mucho espacio, su degradación natural es muy lenta y su almacenamiento es casi imposible en los volúmenes en que se generan. Según Grepalma, en 2023 en Guatemala se plantaron 180,614 hectáreas de palma africana, lo que representa el 1.66% del territorio del país. El procesamiento de la palma para la producción de aceite genera desechos en forma de racimos vacíos de fruta, fibra del mesocarpio y cáscara. Por lo tanto, es crucial encontrar un uso para la biomasa que se desecha después del procesamiento.

Debido a que es una fuente rica en celulosa, este tipo de fibra puede utilizarse para diversas aplicaciones. Este trabajo busca evaluar el uso de la fibra de palma en tres aplicaciones: la industria de generación de energía, la industria cementera y la obtención de fibra celular. El objetivo es proporcionar información específica sobre las aplicaciones de esta fibra de palma africana como una fase exploratoria, dado que actualmente no existe información sobre la utilización de este tipo de fibra en las aplicaciones propuestas.

El uso de biomasa en calderas en Guatemala está en crecimiento, impulsado por la necesidad de fuentes de energía sostenibles. Según los datos disponibles, se estima que se requieren aproximadamente 12,000 toneladas de biomasa anuales para generar 2 MW de energía eléctrica en una planta industrial (Rivera 2012). Por lo tanto, como primer punto, se evalúa la capacidad para generar calor mediante el análisis de su poder calorífico y la generación de cenizas de la muestra. Como segundo punto, se evalúa, mediante la norma COGUANOR NTG 41063, la utilización de la fibra como agregado al cemento y, conforme a la norma ACI 523.3 R-14, se establece si la resistencia cumple con los estándares. Esto es relevante porque empresas como CEMEX han incorporado prácticas sostenibles en su producción, incluyendo el uso de agentes espumantes derivados de biomasa en la fabricación de concreto. Finalmente, se evalúa el rendimiento de la obtención de fibras de celulosa de la muestra y se determina el tipo de fibra adecuada para las aplicaciones, dado que el mercado global de celulosa alcanzó un valor de 77.33 millones de toneladas en 2023 y se estima que crecerá a una tasa de crecimiento anual compuesta del 3.1% entre 2024 y 2032, alcanzando un valor de 101.78 millones de toneladas en 2032 (Informes de expertos, s.f).

Por ello, este trabajo busca evaluar mediante las distintas metodologías y normas mencionadas anteriormente si es posible utilizar la biomasa en las tres aplicaciones. Esto pretende sentar las bases experimentales para poder enfocar esfuerzos en las propuestas que valorizan el residuo y poder concluir si es factible utilizar la fibra de palma en cada aplicación.

### III. OBJETIVOS

#### A. Objetivo general:

Evaluación de las posibles aplicaciones de la fibra de palma africana, a nivel laboratorio.

#### B. Objetivos específicos:

1. Evaluar por medio de la bomba calorimétrica, la potencial aplicación de la fibra de palma africana como biomasa para generar energía.
2. Evaluar por medio de pruebas de resistencia a la comprensión, la posible aplicación como agregado en el cemento para producir cemento celular.
3. Evaluar por medio de la obtención de la fibra celular por el método a la sosa el rendimiento celular de la muestra.

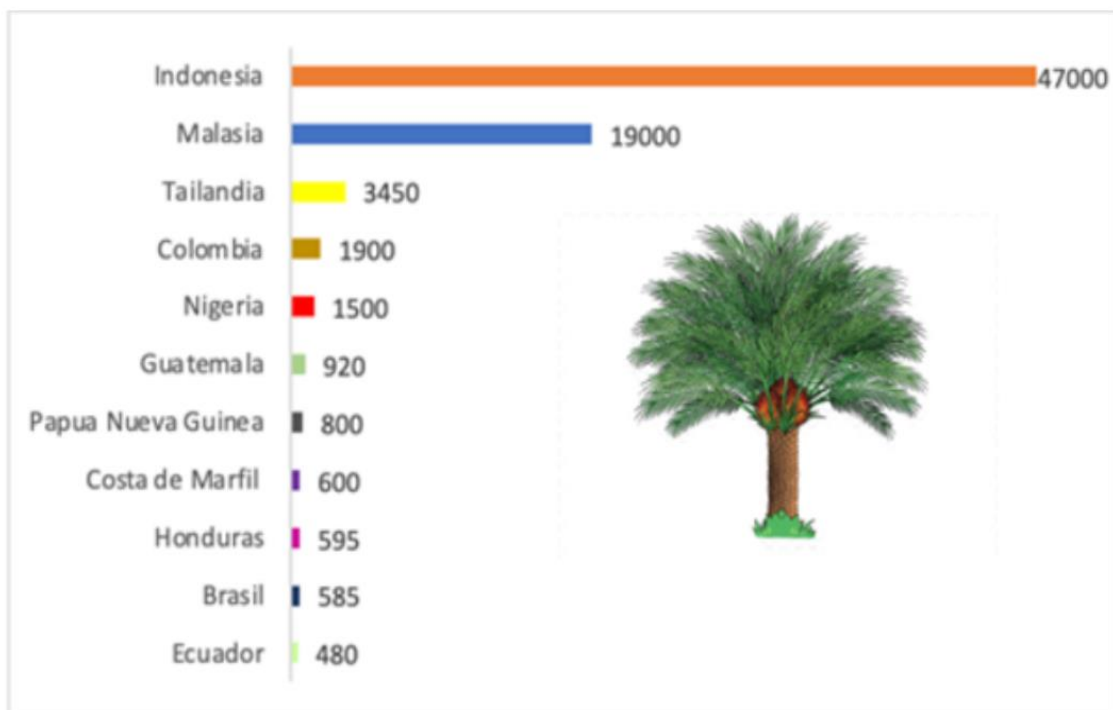
## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Palma africana

La palma de aceite africana es una planta tropical propia de climas cálidos, originaria de la región occidental y central del continente africano, específicamente en el golfo de Guinea, de donde proviene su nombre científico *Elaeis guineensis*. La palma africana es una de las plantas de mayor uso industrial, esto se da por la generación del biodiesel a partir de la extracción del aceite de sus frutos. También se han encontrado usos en industrias alimenticias, cosmética y productos de uso personal (Convención sobre la Diversidad Biológica, s.f.).

Las mayores áreas de cultivo de la palma africana se encuentran en Asia, específicamente en Malasia e Indonesia. Países como Nigeria, Costa de Marfil, América del sur y Centroamérica tienen un gran desarrollo de áreas de cultivo. Se cree que la palma llegó por medio de los portugueses a América, quienes la empleaban como parte de la dieta de los esclavos en Brasil y otros países en este continente (Convención sobre la Diversidad Biológica, s.f.).

*Figura 1: Principales productores de aceite de palma a nivel mundial a diciembre del 2023 en toneladas métricas*

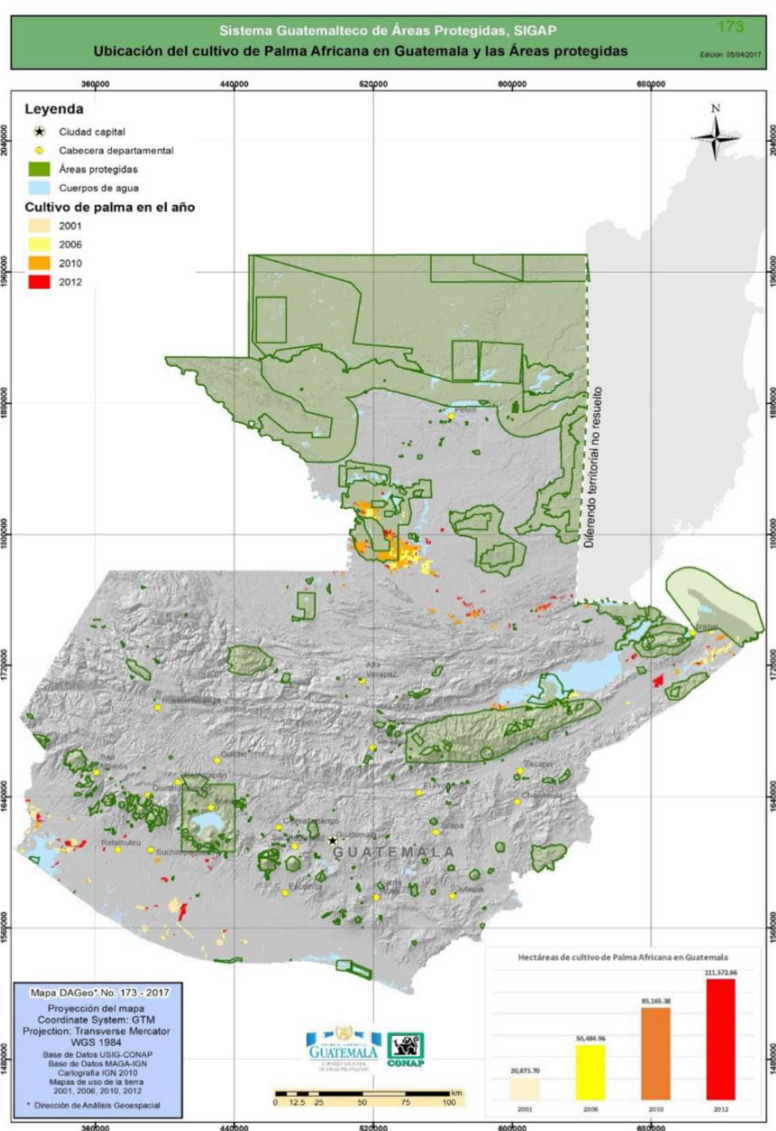


(CADTM, s.f)

## 1. Palma africana en Guatemala

En Guatemala, el sector de la palma africana está conformado en la Gremial de Palmicultores de Guatemala (GREPALMA), la cual estaría integrada por pequeños, medianos y grandes productores. Sin embargo, el sector está dominado por un grupo reducido de grandes familias y sus grupos corporativos, los cuales han constituido un Cártel. En Guatemala se estima que se producen unas 350 mil toneladas de aceite crudo de palma y se consumen 278 mil toneladas en diversos alimentos y productos. Guatemala es el noveno país exportador de aceite de palma, según datos recientes. Cerca del 85% del aceite de palma producido se exporta, principalmente a México. El uso alimenticio es el más importante, seguido por la gran demanda de materia prima para elaborar agrocombustibles y las importaciones cada vez mayores desde Europa sugieren que una buena parte del aceite crudo exportado se destina a este fin (El observador, s.f).

Figura 2: Ubicación del cultivo de palma africana en Guatemala



(El observador, s.f).

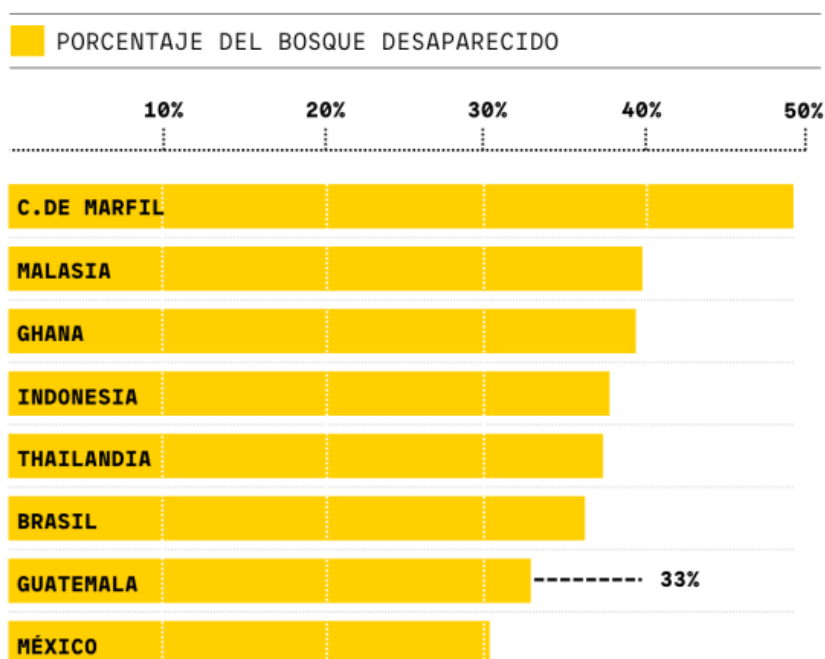
## 2. Impacto social y ambiental

La expansión de la palma africana ha tenido efectos profundos en las comunidades rurales y el medio ambiente. La concentración de la propiedad agraria ha aumentado, con grandes extensiones de tierra siendo controladas por un número reducido de propietarios, lo que ha llevado a la pérdida de tierras agrícolas tradicionales y a la precarización de las condiciones laborales para los trabajadores de estas plantaciones.

Un cálculo realizado por académicos de la Universidad de Chicago (EE.UU) y la organización Inclusive Development International, pone de relieve cómo Guatemala tiene una de las peores tasas de deforestación de América Latina en las áreas adyacentes a las plantas de extracción de palma. El ya citado estudio, realizado por las Universidades de Michigan y McGill, estima que solo las grandes fincas palmeras de Petén, Izabal y Alta Verapaz, en una década, entre 2009 y 2019, provocaron que algo más de 24 mil 500 hectáreas de bosque desaparecieran. En estas regiones, según el estudio, la palma sería responsable de un 28% del total de la deforestación (Asier, 2024).

El análisis de Palm Watch concluyó que en las áreas alrededor de las más de 2 mil extractoras investigadas, en promedio, el 27% del bosque que existía en 2001 ya había sido talado en 2022. Los resultados colocan a Guatemala por encima de este promedio mundial. Alrededor de las 19 extractoras identificadas en el país, desapareció el 33% del bosque (Asier, 2024).

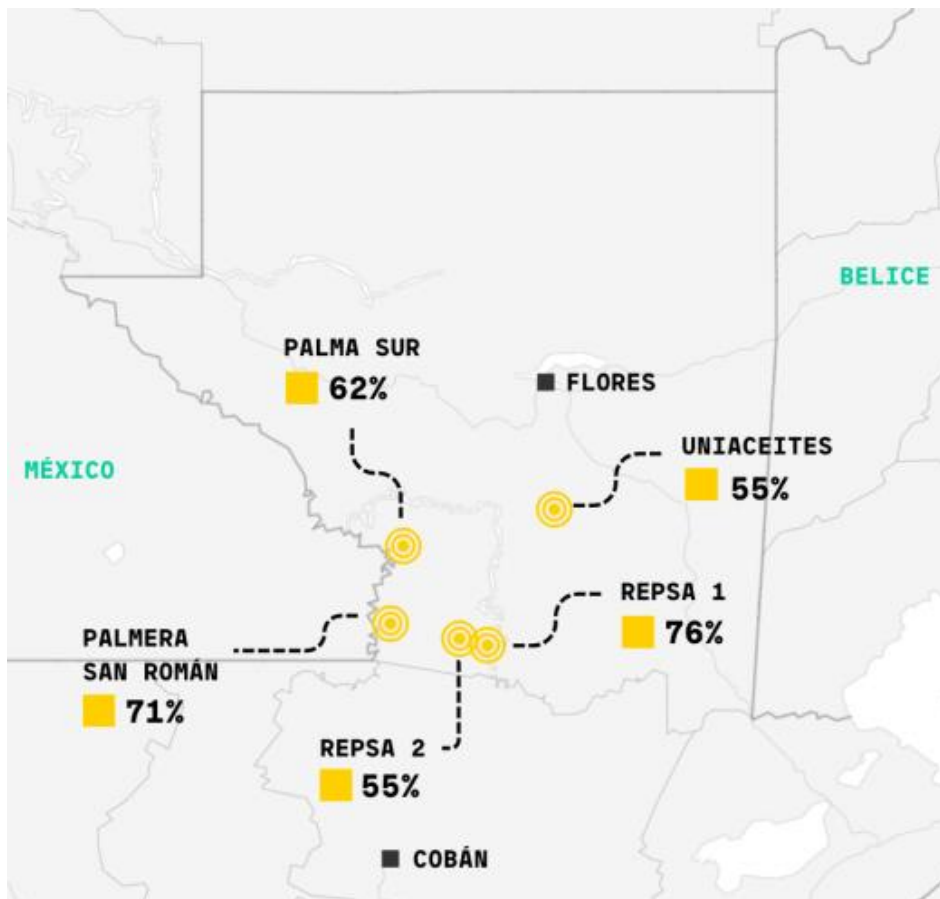
*Figura 3: Porcentaje del bosque desaparecido en el mundo por la palma africana*



(Asier, 2024)

Si se analiza extractora por extractora, los datos procedentes del análisis de imágenes satelitales de Palm Watch muestran cómo las plantaciones en Sayaxché, en Petén, se encuentran entre las que tienen un peor desempeño de todo el continente. De las diez plantas con mayor deforestación asociada en América Latina, cinco están en Petén. Según el análisis, alrededor de la extractora de Repsa I, desapareció el 76% de la cobertura forestal que existía en 2001, unas 5 mil hectáreas. Es la mayor tasa detectada por Palm Watch en toda Latinoamérica (Asier, 2024).

Figura 4: Cinco plantaciones con mayor deforestación de América Latina



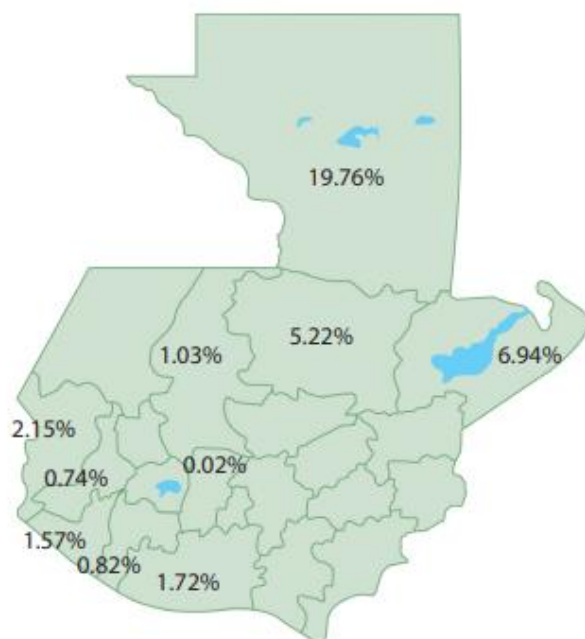
(Asier, 2024)

### 3. Beneficios económicos

A pesar de los problemas asociados, la industria del aceite de palma representa una parte importante de la economía guatemalteca, contribuyendo aproximadamente al 1.2% del PIB y generando alrededor de 28,000 empleos. Además, el aporte de la palma de aceite ha llevado a este sector a ocupar el 5to. puesto en el ranking de exportaciones del país, detrás de vestuario, azúcar, banano y café. Sin embargo, el modelo de desarrollo basado en la palma ha sido criticado por su impacto ambiental y social, y por la falta de regulación efectiva por parte del Estado para mitigar estos efectos (Alonzo, 2024).



Figura 6: Mapa del PIB de la palma de aceite por departamento



(Grepalma,2018)

#### B. Fibra de palma africana

La fibra de palma africana se obtiene principalmente de las hojas y el raquis de la palma. Tiene características que la hacen adecuada para mezclarse con otros tipos de pulpa, especialmente en la producción de cartón reciclado.

El raquis de palma africana es uno de los subproductos generados durante la producción de aceite. El raquis es donde se sitúan los frutos de los cuales se extrae el aceite con el que se produce el biodiesel. Actualmente una vez se sacan los frutos el racimo restante, los distintos residuos que se generan en los procesos, es el raquis el único que no ingresa nuevamente al proceso, por lo que se utiliza como abono agrícola o quemar como desecho industrial. Pero el raquis normalmente no se utiliza en el aprovechamiento energético, ya que contiene mucha humedad y su volumen lo hace difícil de transportar, por lo que se hacen necesarias buscar alternativas que generen valor a este residuo. En consecuencia, el raquis de palma africana se ha convertido en materia prima importante para el estudio de productos de mayor valor agregado y con mayor interés científico debido a su composición química y propiedades (Martinez, s.f).

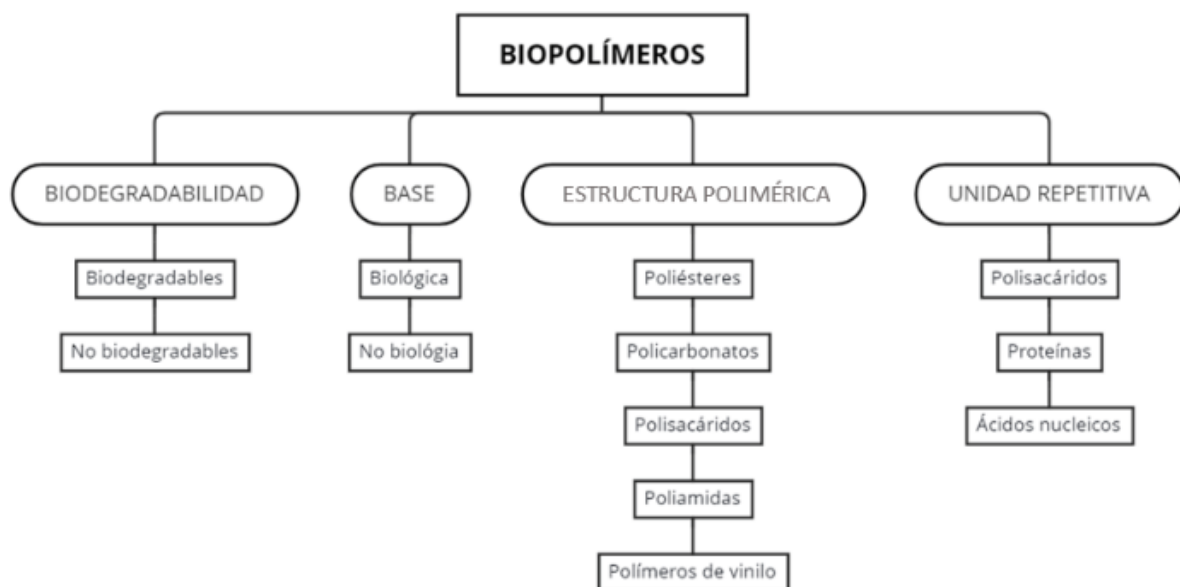
El raquis de palma posee una composición química heterogénea basada principalmente en tres biopolímeros que constituyen entre un 95% y 98% de su composición, la cual es la celulosa, hemicelulosa y lignina. El restante 2% a 5% los constituyen moléculas de bajo peso molecular llamadas extractivos. La celulosa y la lignina son los mayores constituyentes de las paredes celulares vegetales, por esta razón a los residuos provenientes de las plantas se les conoce como residuos lignocelulósicos (Jirón, 2022).

### C. Biopolímeros

Los biopolímeros o polímeros biobasados, son materiales plásticos que se obtienen de fuentes renovables y naturales. Los más comunes son de residuos agrícolas, de celulosa o almidón de patata o maíz. Concretamente, se pueden obtener biopolímeros de diferentes hidratos de carbono por ejemplo: azúcar, almidón, celulosa, lignina, bio grasas o aceites. Al ser extraídos de fuentes naturales, los biopolímeros reducen la dependencia de la industria a fuentes no renovables como materiales fósiles, por lo que disminuyen considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero. Muchos de estos biopolímeros son biodegradables, porque al finalizar su ciclo de vida es descompuesto completamente por los microorganismos, esto depende de su estructura química. Por lo tanto, ser biodegradables no es un requisito esencial de los biopolímeros, sino una cualidad extra que presentan algunos de ellos (Zchimmer & Zchwars, 2020).

Actualmente, solo el 0,4 % de la producción mundial corresponde a biopolímeros, debido a su elevado costo, que no puede luchar contra el plástico. Algunas estrategias que se están evaluando para reducir el costo de los biopolímeros es el uso de subproductos de la industria como materia prima, el diseño de biorreactores o las mejoras en los procesos (Zchimmer & Zchwars, 2020).

Figura 7: Clasificación de los biopolímeros



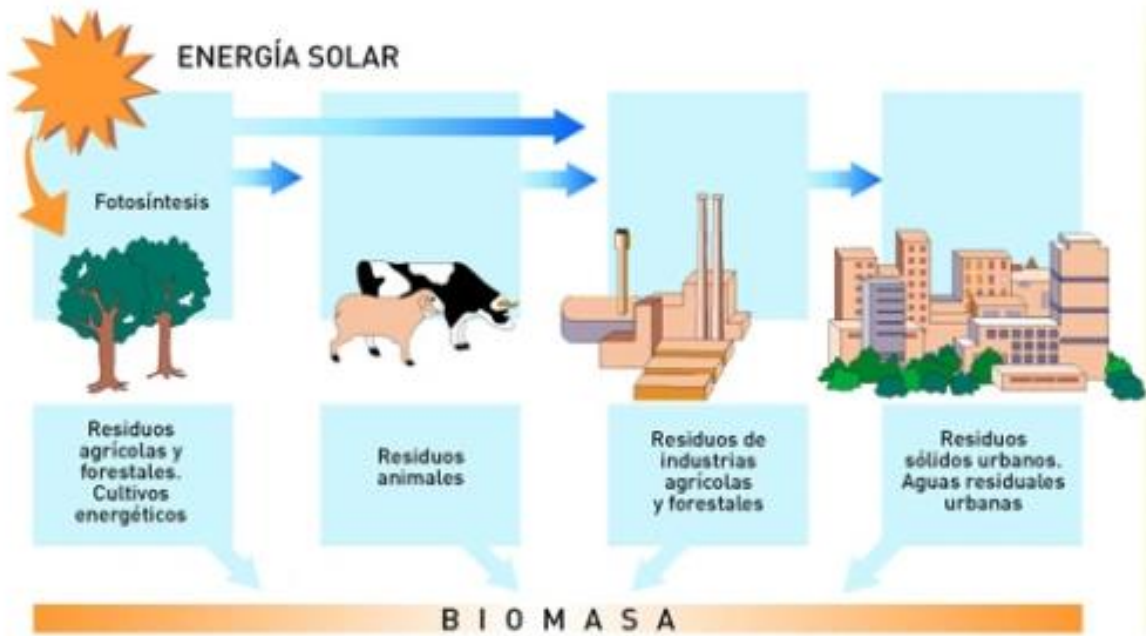
(Bernadette, 2020)

### D. Biomasa

La Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, define la biomasa como la fracción biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico (Fundación para la investigación y difusión de la arquitectura, s.f)

La biomasa es, por tanto, materia orgánica utilizada como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza (Administración del Estado, 2024).

Figura 8: Clasificación de la biomasa



(Heura Medio Ambiente, 2012)

### 1. Combustión de biomasa en calderas

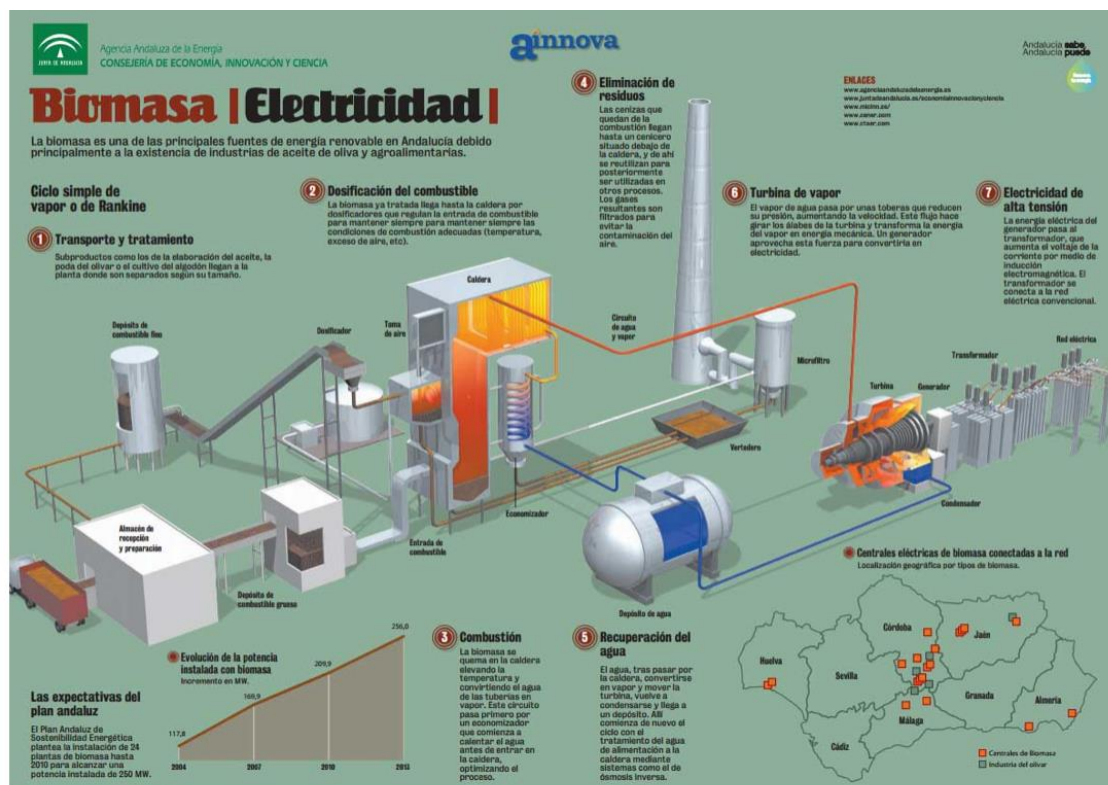
La combustión de biomasa en calderas es una tecnología cada vez más utilizada para la generación de calor y energía de manera sostenible. Estas calderas aprovechan diversos tipos de combustibles de origen biológico, como pellets, astillas, huesos de aceituna, cáscaras de frutos secos, entre otros.

#### Funcionamiento de las calderas de biomasa

El proceso de combustión en una caldera de biomasa se lleva a cabo de la siguiente manera:

- El combustible de biomasa se almacena en un contenedor y es alimentado al quemador mediante un sistema automatizado, como un tornillo sin fin.
- En el quemador, la biomasa se calienta y se produce la combustión, liberando energía térmica.
- Los gases calientes provenientes de la combustión pasan a través de un intercambiador de calor, donde ceden su energía al agua que circula por el interior de la caldera.
- El agua calentada se utiliza para la generación de vapor o agua caliente, que puede ser empleada para calefacción, agua sanitaria o procesos industriales.
- Los residuos de la combustión, principalmente cenizas, se eliminan periódicamente (Sian, 2022).

Figura 9: Funcionamiento de una caldera de biomasa



(Agua ahorro, s.f)

## 2. Tipos de calderas de biomasa

Existen diferentes tipos de calderas de biomasa, clasificadas según el combustible utilizado y la tecnología empleada:

- Calderas de pellets: diseñadas específicamente para quemar pellets de serrín prensado (Sian, 2022).
- Calderas de astillas: utilizan astillas de madera provenientes de residuos forestales y agrícolas (Sian, 2022).
- Calderas de huesos de aceituna y cáscaras de frutos secos: aprovechan estos residuos agroindustriales como combustible (Sian, 2022).
- Calderas de leña: queman troncos de madera, generalmente en sistemas de gasificación (Sian, 2022).
- Calderas policombustibles: que pueden utilizar diferentes tipos de biomasa, y calderas de condensación que alcanzan rendimientos superiores al 100% al aprovechar el calor latente de los gases de escape (Sian, 2022).

*Figura 10: Tipos de combustible en caldera de biomasa*



(Isved, s.f)

### 3. Ventajas de la combustión de biomasa

La combustión de biomasa en calderas ofrece varias ventajas:

- **Sostenibilidad:** al utilizar residuos orgánicos como combustible, se reduce la dependencia de combustibles fósiles.
- **Reducción de emisiones:** la biomasa es considerada un combustible neutro en carbono, ya que el CO<sub>2</sub> liberado durante la combustión es absorbido por las plantas durante su crecimiento.
- **Ahorro económico:** los combustibles de biomasa, como pellets y astillas, suelen tener un menor coste que los combustibles fósiles (Sian, 2022).

En algunos ingenios azucareros, hasta un 30% del bagazo producido se utiliza para generar vapor, que es esencial para el funcionamiento de las calderas y la producción de energía eléctrica. En ingenios que han modernizado sus procesos, se ha reportado que la cogeneración puede generar hasta 12,000 kW de energía eléctrica, lo que no solo satisface las necesidades del ingenio, sino que también permite la venta de excedentes a la red eléctrica. Por lo que al utilizar fibras de palma africana, se podría llegar a tener los mismos beneficios que con el bagazo y la madera.

### 4. Poder calorífico

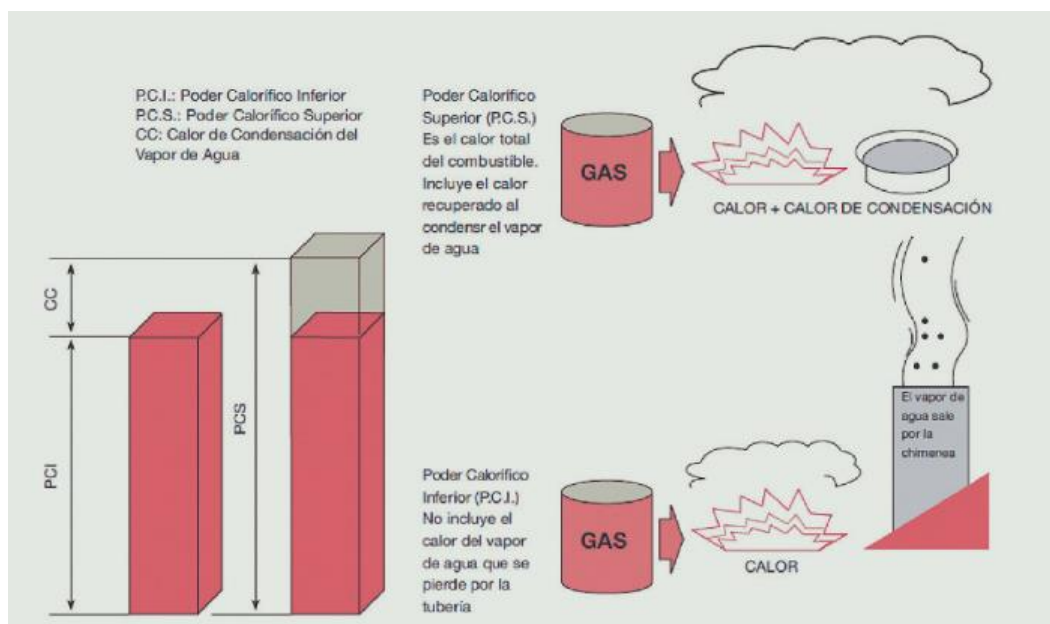
El poder calorífico es una propiedad física que indica la cantidad de energía liberada en forma de calor durante la combustión completa de una unidad de masa de un combustible. En otras palabras, es una medida de la cantidad de energía almacenada en un combustible que se libera cuando se quema (Del real, 2018).

Existen dos tipos principales de poder calorífico:

- Poder Calorífico Superior (PCS): El poder calorífico superior considera la energía liberada durante la combustión, incluyendo el calor latente del vapor de agua formado. Es decir, asume que el vapor de agua producido durante la combustión se condensa y libera su calor latente.
- Poder Calorífico Inferior (PCI): El poder calorífico inferior no considera el calor latente del vapor de agua. Sólo considera la energía liberada en forma de calor sensible, excluyendo el calor necesario para evaporar el agua formada durante la combustión.

En general, se considera que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre 3000 y 3500 kcal/kg (3,5 a 4,1 kWh/kg) para residuos lignocelulósicos como madera y otros desechos vegetales. Para los pellets de madera, que tienen un bajo contenido de humedad, el poder calorífico puede alcanzar las 4100 kcal/kg (4,8 kWh/kg). El poder calorífico es una propiedad importante al evaluar la eficiencia energética de un combustible. Cuanto mayor es el poder calorífico, más energía se puede obtener por unidad de masa del combustible (Del real, 2018).

Figura 11: Diferencia entre poder calorífico superior e inferior



(Revista Anales del ICAI, s.f)

## 5. Calor latente

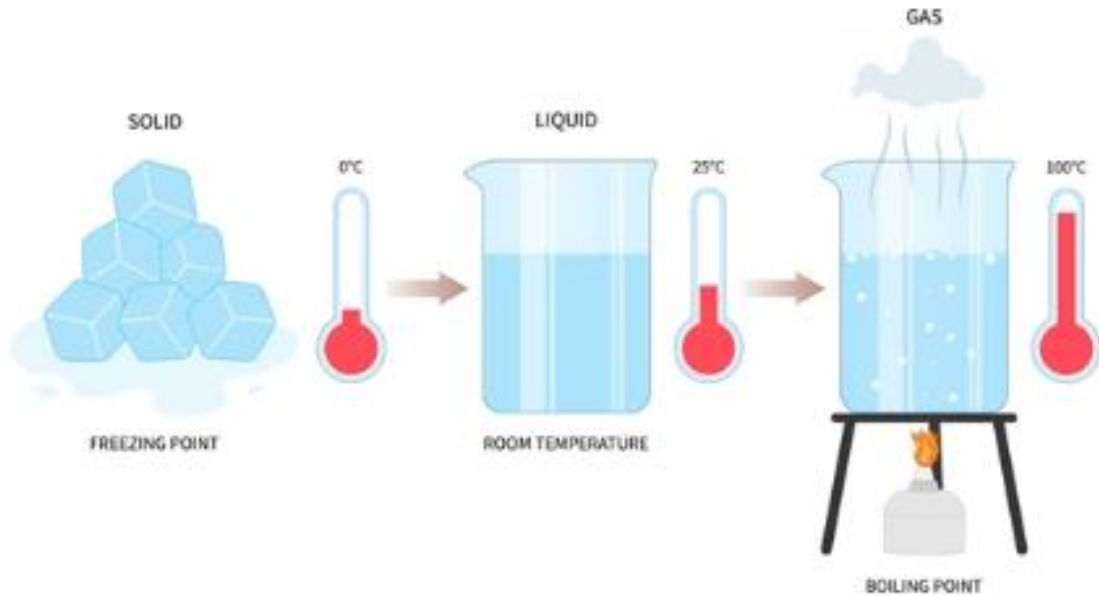
El calor latente es la cantidad de energía térmica que se intercambia durante un cambio de fase de una sustancia, sin que su temperatura varíe. Cuando una sustancia cambia de estado, absorbe o libera calor latente. Por ejemplo, al calentar hielo, este absorbe calor hasta alcanzar su punto de fusión, momento en el cual se convierte en agua sin que su temperatura aumente. Similarmente, al enfriar vapor de agua, este libera calor latente al condensarse en líquido, manteniendo también constante su temperatura durante el proceso (Área Cooling, s.f).

Tipos de calor latente

- Calor latente de fusión: Energía necesaria para convertir un sólido en líquido.
- Calor latente de vaporización: Energía necesaria para convertir un líquido en gas.

- Calor latente de congelación: Energía liberada cuando un líquido se convierte en sólido.

Figura 12: Tipos de calor latente del agua



(Pepermprom, 2022)

## 6. Bomba calorimétrica

Una bomba calorimétrica es un dispositivo utilizado para medir el poder calorífico de combustibles sólidos y líquidos mediante la combustión de una muestra en un entorno controlado. Este aparato permite determinar la cantidad de energía liberada durante la combustión de un combustible a volumen constante, lo que es crucial para evaluar su eficiencia energética.

### Componentes y funcionamiento

- Estructura: La bomba calorimétrica está compuesta por un recipiente hermético (la bomba) que puede soportar altas presiones, un calorímetro que contiene agua, y un sistema de control para la ignición y agitación.
- Proceso de combustión: La muestra de combustible se coloca en el crisol dentro de la bomba, que se llena con oxígeno a alta presión. La combustión se inicia mediante un alambre que se calienta eléctricamente. El calor generado se transfiere al agua en el calorímetro, lo que provoca un aumento en la temperatura del agua.
- Medición: A través de un termómetro, se mide el cambio de temperatura del agua, lo que permite calcular el calor liberado durante la combustión. Este valor se utiliza para determinar el poder calorífico del combustible (Edibon, s.f).

### Aplicaciones

La bomba calorimétrica es fundamental en laboratorios de investigación y en la industria para:

- Evaluar combustibles: Determinar el poder calorífico de diferentes tipos de combustibles, como biomasa, carbón, y combustibles líquidos.

- Investigaciones científicas: Realizar experimentos sobre la entalpía de combustión y otros estudios termodinámicos (Edibon, s.f).

*Figura 13: Bomba calorimétrica y sus partes*



(Edibon, s.f)

#### E. Concreto

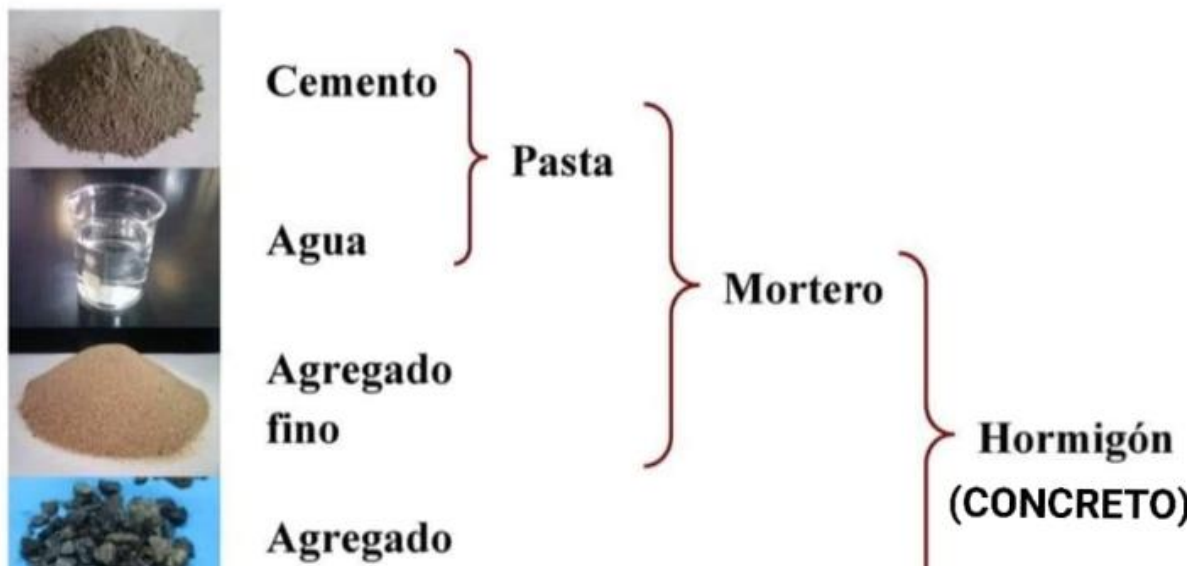
El concreto es la mezcla de cemento Portland o cualquier otro tipo de cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos. A continuación se detalla cada uno de estos componentes:

- **Cemento:** Este se define como un material pulverizado que al agregarle una gran cantidad de agua forma una pasta aglomerante capaz de endurecerse debajo del agua y en la superficie (Barriaga, 2023).
- **Agua:** El agua de mezcla del concreto tiene como principales funciones reaccionar con el cemento para hidratarlo al actuar como lubricante para contribuir a la trabajabilidad del conjunto y procurar la estructura de vacíos necesaria en la pasta para que los productos de hidratación tengan espacio para desarrollarse (Barriaga, 2023).
- **Agregados:** Es el material granular, como la arena, grava, piedra triturada, escoria de alto horno triturada, o residuos de construcción y demolición que se utiliza con un medio de cementación para producir concreto. Dependiendo de su tamaño, podemos existen dos tipos de agregados. El agregado grueso, el cual queda retenido en el tamiz Número 4 y tiene un tamaño mayor a 4.75 mm y el agregado fino, el cual pasa la maya Número 4 y queda retenido en la malla Número 200, su tamaño es menor que 4.75 mm pero mayor a 75 micras (Barriaga, 2023).

- Aditivos: Los aditivos son un material utilizado como componente del concreto y se añade a éste antes o durante su mezclado a fin de modificar sus propiedades. Los aditivos pueden clasificarse en:
  - a) Acelerantes: sustancias que reducen el tiempo normal de endurecimiento de la pasta de cemento y aceleran el tiempo normal de desarrollo de la resistencia.
  - b) Incorporadores de aire: su propósito es incorporar aire en forma de burbujas esferoidales uniformemente distribuidas en la mezcla, con la finalidad principal de hacerlo resistente a bajas temperaturas.
  - c) Retardadores: Tienen como objetivo incrementar el tiempo de endurecimiento normal del concreto (Barriaga, 2023).

Este es el material de construcción más usado en el mundo. El concreto posee una excelente resistencia al agua, al contrario de la madera y del acero ordinario, este posee una habilidad de resistir la acción del agua (Barriaga, 2023).

*Figura 14: Materiales componentes del concreto*



(Inieria para todos,2020)

### 1. Propiedades del concreto

En estado fresco existen distintas propiedades importantes como la trabajabilidad, es la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una determinada cantidad de concreto fresco con la mínima pérdida de homogeneidad. Esta propiedad determina la facilidad con la que el concreto puede ser mezclado, colocado, consolidado y terminado. Esta es una propiedad fundamental ya que el concreto debe tener una trabajabilidad de tal manera que la compactación dé la máxima densidad posible con una cantidad razonable de trabajo o con la cantidad que estamos dispuestos a poner en determinadas condiciones (Barriaga, 2023).

La consistencia es la habilidad del concreto fresco o mortero de fluir. También puede ser definida como el grado de humedad de la mezcla de concreto. La densidad es la suma de las masas de todos los ingredientes de un lote de concreto dividido por el volumen ocupado. Y la segregación es la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea y su distribución ya no es uniforme. En el caso del concreto, son las diferencias entre el tamaño de las partículas y la gravedad específica de los constituyentes de la mezcla.

Por el otro lado, en el estado endurecido la resistencia es considerada como la propiedad más importante y da una visión global de la calidad del concreto porque la resistencia está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento hidratada. La resistencia del concreto depende principalmente de dos factores: la relación agua/cemento y el grado de compactación. La durabilidad es la capacidad del concreto de soportar los procesos de deterioro al que pueden ser expuestos. Deben mantener su resistencia y capacidad de servicio durante la vida útil. La extensibilidad es la propiedad del concreto de deformarse sin agrietarse y es en función de la deformación unitaria máxima que puede asumir el concreto sin que ocurran fisuraciones y por último la impermeabilidad que se define como la imposibilidad de ser penetrado por un líquido y es muy importante porque las estructuras como tanques, muros de sótanos o pisos de sótanos ubicados por debajo del nivel freático deben ser impermeables para evitar la penetración de agua. Para lograr un concreto impermeable, los agregados deben ser materiales durables, sin poros y bien graduados, además, el concreto debe ser denso, tener una baja relación agua/cemento, ser trabajable y las partículas de los agregados deben estar bien ligadas entre sí por la pasta de cemento (Barriaga, 2023).

*Figura 15: Estados del concreto*



(Sika Mexicana, 2013)

## 2. Hidratación y curado del cemento

La hidratación es el conjunto de reacciones químicas entre el agua y los componentes del cemento que ocasionan el cambio del estado plástico al endurecido del concreto. Inicialmente la velocidad con la que se desarrolla la hidratación es muy rápida, y ésta va disminuyendo con el paso de los días. Las etapas del proceso de hidratación del concreto son:

- Plástico: es la unión del agua y la pasta de cemento formando una pasta moldeable. Cuanto menor es la relación agua/cemento, mayor es la concentración de partículas de cemento en la

pasta compactada y por ende la estructura de los productos de hidratación es mucho más resistente (Barriaga, 2023).

- Fraguado inicial: condición de la pasta de cemento en la que se aceleran las reacciones químicas, comienza el endurecimiento y la pérdida de plasticidad (Barriaga, 2023).
- Fraguado final: se caracteriza por el endurecimiento significativo y las deformaciones permanentes (Barriaga, 2023).
- Endurecimiento: es el estado final de la pasta, en el que se mantienen e incrementan con el tiempo las características resistentes (Barriaga, 2023).

El curado es la manutención de la temperatura y del contenido de humedad satisfactorios para que se puedan desarrollar las propiedades deseadas en el concreto. Este permite al concreto tener una mayor durabilidad, resistencia, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad dimensional, resistencia a congelación. Existen tres métodos para mantener el concreto húmedo:

- Métodos que mantienen el agua de la mezcla presente durante los periodos iniciales de endurecimiento.
- Métodos que retienen la humedad y reducen la pérdida del agua de la mezcla de la superficie del concreto. Esto se logra cubriendo el concreto con papel impermeable o plástico o a través de la aplicación de compuestos formadores de membrana.
- Métodos que aceleran el desarrollo de la resistencia a través del suministro de calor y humedad adicional al concreto, por medio del vapor directo (Barriaga, 2023).

### 3. Compresión a la resistencia

Una máquina de compresión a la resistencia es un equipo de ensayo utilizado para determinar la capacidad de un material para soportar cargas aplicadas de compresión. Este tipo de máquina es esencial en la evaluación de la resistencia de diversos materiales, como el concreto, el papel, el cartón y otros productos estructurales.

#### Funciones y Aplicaciones

Las máquinas de compresión realizan pruebas específicas que se dividen en:

- Pruebas de resistencia a la compresión vertical: Miden la capacidad de un material para resistir fuerzas que intentan aplastarlo.
- Pruebas de resistencia a la compresión horizontal: Evalúan cómo un material se comporta bajo cargas aplicadas lateralmente.
- Pruebas de adhesión: Determinan la resistencia de un material a la separación bajo carga.

Estas máquinas son fundamentales para fabricantes de materiales de construcción y laboratorios de investigación, donde se requiere garantizar que los productos cumplan con estándares de calidad y seguridad. Las máquinas de compresión suelen contar con un control de carga el cual permite aplicar cargas de manera controlada y uniforme sobre la muestra. Además, tienen sistemas de medición los

cuales incorporan pantallas que muestran en tiempo real la fuerza aplicada y otros parámetros relevantes. Por último, algunos contienen un software de análisis que facilitan el almacenamiento y análisis de datos, permitiendo la generación de informes gráficos y estadísticos de los resultados obtenidos (Forney, s.f.).

*Figura 16: Distintos tipos de máquina de resistencia a la compresión*



(Forney, s.f.)

## F. Celulosa

Los hidratos de carbono,  $(CH_2O)_n$ , son los productos orgánicos naturales más abundantes de la naturaleza y su importancia biológica e industrial es elevada. Los hidratos de carbono de mayor importancia para la industria química son diversos azúcares, el almidón y la celulosa. La estructura y aplicaciones de los azúcares y del almidón se estudiarán en la asignatura Química Industrial Alimentaria. Biotecnología.

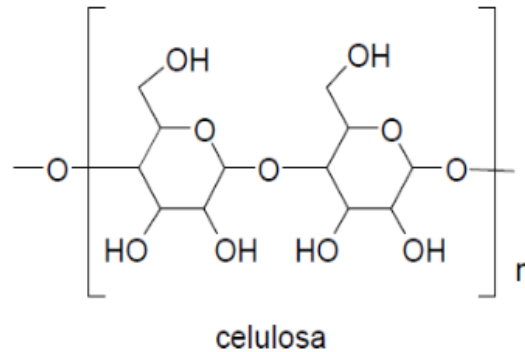
La celulosa es un polímero de alto peso molecular, lineal y polidisperso. Sin embargo, sus cadenas tienen una alta tendencia a formar agregados altamente ordenados, como consecuencia de su constitución química y de su capacidad para formar enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares entre los grupos hidroxilo de las unidades de anhidroglucosa durante la biosíntesis. Los enlaces de hidrógeno son los responsables de la alta cohesión molecular en la celulosa, por lo que origina que las cadenas puedan alinearse en grupos, formando zonas ordenadas cristalinas unidas a regiones desordenadas llamadas amorfas (García- García, 2013).

La celulosa posee propiedades mecánicas de resistencia como: tracción, rasgadura, fragmentación, plegado, flexión con rigidez estática dinámica, abrasión, compresión. También propiedades ópticas como su blancura, opacidad, brillo. Por último, propiedades de textura como el gramaje, porosidad, permeabilidad al agua y a otros líquidos (Barriaga, 2023).

Como materia prima, la celulosa posee una gran cantidad de ventajas. En primer lugar, es un material biodegradable ya que es 100% reciclable y su ciclo de vida es ilimitado. Esta es la razón por la que puede ser reutilizada como material para incluirlo en la elaboración del concreto. La celulosa es de fácil transporte, rápida aplicación, no deja residuos ya que se aprovecha todo el material. Además, la celulosa es un buen aislante térmico porque reduce la transferencia de calor hacia o desde el ambiente porque tiene una baja conductividad térmica. También es un aislamiento acústico porque impide que los

sonidos se propaguen de un lado a otro o que al momento de transmitirse pierdan la mayor parte de su intensidad (Barriaga, 2023).

Figura 17: Estructura de la celulosa



(Barriaga, 2023)

#### G. Agregados de celulosa al cemento

Los agregados de celulosa en el cemento son materiales que se incorporan a las mezclas de cemento y morteros para mejorar ciertas propiedades físicas y mecánicas del producto final. Estos agregados, que pueden derivarse de papel reciclado o fibras de celulosa, aportan características beneficiosas en diversas aplicaciones de construcción (León, 2017).

#### Propiedades y beneficios

- Mejora de la resistencia: La incorporación de celulosa puede aumentar la resistencia del mortero o concreto, ayudando a reducir la formación de microfisuras y mejorando la cohesión del material.
- Aditivos en morteros adhesivos: En los morteros adhesivos, las fibras de celulosa son utilizadas para modificar la reología, lo que permite un mejor manejo y aplicación del producto. Esto es esencial para asegurar una buena adherencia al sustrato y prolongar el tiempo de trabajo sin comprometer la calidad de la unión.
- Aislamiento térmico y acústico: Los agregados de celulosa pueden contribuir a mejorar las propiedades de aislamiento térmico y acústico de los materiales de construcción, haciéndolos más eficientes en términos de energía y confort.
- Sostenibilidad: Al utilizar celulosa reciclada, se promueve un enfoque más sostenible en la construcción, reduciendo la dependencia de materiales vírgenes y aprovechando residuos industriales (León, 2017).

#### Aplicaciones

Los agregados de celulosa se utilizan en diversas aplicaciones dentro de la industria de la construcción, tales como:

- Morteros: Se emplean en la elaboración de morteros para adhesivos de baldosas, donde mejoran la trabajabilidad y la adherencia.
- Paneles de cemento: En la fabricación de paneles de cemento, la celulosa puede ser parte de la mezcla para mejorar la resistencia y durabilidad del producto final (León, 2017).

## H. Trituración

La molienda es una operación unitaria para reducir el tamaño de partícula de un sólido, basada en someter la materia a esfuerzos de compresión, impacto, cortado y/o fricción. Para dicha reducción de tamaño se cuenta con dos equipos: trituradoras y molinos. El impacto genera productos gruesos, medios o finos. La frotación produce productos muy finos a partir de materiales blandos no abrasivos. El corte produce un tamaño definido de partícula y en algunas ocasiones con muy pocos finos (McCabe, 2016).

### 1. Molinos

Término para describir una gran variedad de máquinas de reducción de tamaño para servicio intermedio. El producto de un triturador se introduce como alimentación de un molino, reduciéndose a polvo. Estos son molinos de martillos e impactores, máquinas de rodadura - compresión, molinos de frotación y molinos de volteo (McCabe, 2016).

- Molino de martillos

Constan de un eje usualmente horizontal el cual gira a alta velocidad dentro de una carcasa cilíndrica (McCabe, 2016). Partes de un molino: rotor, martillos separadores, alimentador y canasto

- Molinos de rodillos

Los sólidos son atrapados y triturados entre rodillos cilíndricos verticales y un gran anillo. Se mueven a velocidades moderadas en trayectoria circular. Envasadores levantan los trozos de sólidos desde el piso del molino y los conducen entre el anillo y rodillos, donde sucede la reducción (McCabe, 2016)

- Molinos de frotación o atrición

Partículas de sólidos blandos son frotadas entre las caras planas estriadas de unos discos circulares rotatorios. Donde un disco es estacionario y el otro gira; ambos discos giran a alta velocidad en sentidos contrario (McCabe, 2016).

- Molinos de volteo

Carcasa cilíndrica que gira muy lento alrededor de un eje horizontal y está llena aproximadamente hasta la mitad de su volumen con un medio sólido de molienda. Carcasa por lo general de acero, con un recubrimiento de lámina placa de acero al alto carbono, porcelana, roca de sílice o caucho. Los molinos de volteo son inadecuados para la reducción intermedia y fina de materiales abrasivos (McCabe, 2016).

- Molino de discos

Cuenta con dos discos de molienda con un grueso dentado interno que actúan en sentido opuesto. Utilizada para trituración fina en el rango medio de tamaño de partícula de sólidos blandos a duros, viscosos y sensibles a la temperatura (Maquinaria, 2021).

- Molino oscilante de discos

Ideal para molienda rápida de materiales blandos a duros, quebradizos, viscosos, fibrosos y húmedos a una granulometría para el análisis. Realizada por oscilaciones circulares del juego de molienda sobre un plato oscilante con una presión extremadamente alta, impactos y abrasión (Maquinaria, 2021).

- Molino de martillo

Utilizado para moler una amplia gama de materiales hasta alcanzar un tamaño de partícula medio, empleando una lluvia de golpes de martillo para destruir y desintegrar el material (actúa por impacto) (Stedman, 2022).

Ventajas:

- Eficaz en la reducción del tamaño de las partículas
- Flexibilidad en el ajuste de la granulometría
- Fácil mantenimiento y reemplazo del martillo
- baja inversión inicial

Desventajas:

- Mayor desgaste de las piezas debido a la fricción entre los martillos y el material
- Mayor consumo de energía en comparación con otros tipos de molinos
- Producción de polvo y ruido durante el proceso de rectificado.

*Figura 18: Tipos de molinos*



(JXSC Machine, s.f)

## I. Tamizaje

El tamizaje de agregados en el cemento es un proceso fundamental que se utiliza para determinar la distribución de tamaños de las partículas que componen los agregados, ya sean finos o gruesos. Este proceso es crucial para garantizar que los agregados cumplan con las especificaciones requeridas para la producción de cemento y concreto de alta calidad.

### Proceso de tamizaje

- Muestreo: Se toma una muestra representativa del agregado que se va a analizar.
- Uso de Tamices: La muestra se coloca en una serie de tamices con aberturas de diferentes tamaños, generalmente dispuestos de mayor a menor.
- Agitación: Los tamices se agitan, ya sea manualmente o mediante un tamiz vibratorio, permitiendo que las partículas más pequeñas pasen a través de las mallas, mientras que las más grandes quedan retenidas.

- Pesaje: Se pesa la cantidad de material retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje de cada fracción en relación con la muestra total.
- Curva Granulométrica: Los resultados se utilizan para construir una curva granulométrica, que muestra la distribución de tamaños de las partículas del agregado (Mettler Toledo, s.f.).

### Clasificación por mesh ASTM

La clasificación de los sólidos mediante tamizaje se puede realizar utilizando la norma ASTM (American Society for Testing and Materials), que define el tamaño de las aberturas de los tamices en términos de "mesh" (malla). El "mesh" se refiere al número de aberturas por pulgada lineal en un tamiz. Por ejemplo, un tamiz de 20 mesh tiene 20 aberturas por pulgada, lo que significa que el tamaño de cada abertura es más pequeño en comparación con un tamiz de 10 mesh (Instituto Mexicano del Transporte, s.f).

Tamaños de tamiz: La norma ASTM proporciona una tabla que relaciona el número de mesh con el tamaño de las aberturas en milímetros o micrómetros. Por ejemplo:

- 10 mesh = 2.00 mm
- 20 mesh = 0.85 mm
- 40 mesh = 0.425 mm
- 60 mesh = 0.250 mm
- 100 mesh = 0.149 mm

### Uso de tamices:

Durante el tamizaje, se utiliza una serie de tamices con diferentes tamaños de mesh para separar las partículas en varias fracciones. Las partículas que son más grandes que el tamaño de abertura del tamiz quedan retenidas, mientras que las más pequeñas pasan a través. El tamizaje es crucial para asegurar que los materiales cumplan con las especificaciones requeridas para su uso en aplicaciones industriales.

Permite:

- Control de calidad: Asegurar que los materiales tengan el tamaño adecuado para su aplicación específica.
- Optimización de procesos: Mejorar la eficiencia en la producción al separar partículas no deseadas.
- Mejora de propiedades: Afectar las propiedades físicas, mecánicas y de comportamiento de los materiales en su aplicación final (Instituto Mexicano del Transporte, s.f).

### 1. Tipos de tamizadores

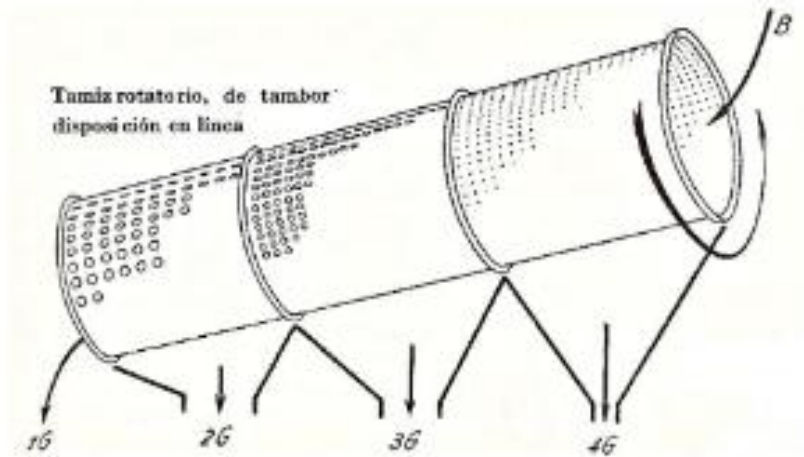
Existe una gran variedad de tamices para distintas finalidades. En la mayoría de los tamices las partículas pasan a través de las aberturas por gravedad, pero en algunos casos las partículas son forzadas a través del tamiz por medio de un cepillo o mediante fuerza centrífuga. Existen partículas que pasan fácilmente a través de aberturas grandes en una superficie estacionaria, pero otras precisan de alguna forma de agitación, como sacudidas, giro o vibración mecánica o eléctrica (McCabe, et al., 2007).

### Tipos de tamices:

- Tamices giratorios

Estos aparatos constan de varios tamices, acoplados unos encima de otros, formando una caja o carcasa. El tamiz más grueso se sitúa en la parte superior y el más fino en la inferior. Los tamices y la carcasa se hacen girar para forzar el paso de las partículas a través de las aberturas de los tamices. (McCabe, et al., 2007).

*Figura 19: Tamiz giratorio*

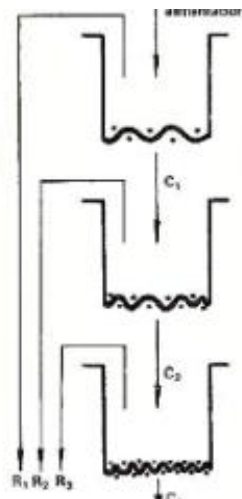


(Emjuvi, s.f)

- Tamices vibratorios

Estos obstruyen con menos facilidad que los tamices giratorios. Las vibraciones se pueden generar mecánica o electrónicamente. Las vibraciones mecánicas generalmente se transmiten desde excéntricas de alta velocidad hasta la carcasa de la unidad y desde ésta hasta los tamices inclinados. (McCabe, et al., 2007).

*Figura 20: Tamiz vibratorio*

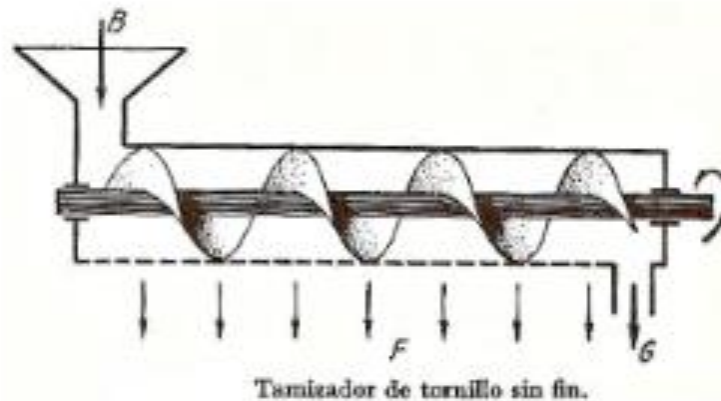


(Emjuvi, s.f)

- Tamices centrífugos

Este consiste en un cilindro horizontal de tela metálica o de material plástico. Contiene palas helicoidales de alta velocidad sobre un eje central que impulsan los sólidos contra la parte interior del tamiz estacionario, con lo cual las partículas finas pasan a través del tamiz mientras que lo demás es transportado hasta el lugar de descarga (McCabe, et al., 2007).

Figura 21: Tamiz centrífugo



(Emjuvi, s.f)

## 2. Granulometría de agregados

La granulometría se refiere a la distribución por tamaños de las partículas que componen un agregado. Se determina haciendo pasar una muestra representativa a través de una serie de tamices ordenados por abertura, de mayor a menor. La granulometría afecta directamente la trabajabilidad, porosidad, contracción y economía del concreto. Permite un mejor empaquetamiento de las partículas, reduciendo los vacíos. Una curva granulométrica continua y bien gradada mejora las propiedades del concreto.

- Agregado fino: La incorporación de este componente de arena es de gran importancia en una mezcla de concreto, alcanzando un porcentaje de participación de hasta 30%. Este debe estar bien gradado para llenar todos los espacios correspondientes y producir una mezcla compacta. Este se define como aquel que pasa el tamiz 3/8" y queda retenido en la malla N° 200. Se emplea en el concreto para facilitar el acabado, impedir la segregación entre otros (León, 2017).
- Agregado grueso: Componente el cual, de cierta forma, finaliza la dosificación de una mezcla de concreto convencional, teniendo una participación de hasta 51% en ciertas mezclas. Porcentualmente, el agregado grueso es muy elevado, pues proporciona gran resistencia a una mezcla de concreto, según sean las características de esta. La mejor forma de los agregados se obtiene cuando son partículas esféricas y cúbicas, debido a que genera esta resistencia deseada, además de un consumo menor de cemento por el acomodo que tienen estas partículas entre sí. Estos agregados deben tener un desgaste no mayor a un 40%, y también este material debe quedar retenido en la malla N.º4. Principalmente, se deben evitar partículas con formas angulosas, debido a que producen mezclas ásperas y difíciles de manejar. Debe cumplir con la norma NTP 400.037, la cual es la equivalente a la ASTM C33 (León, 2017).

### 3. Agregado fino

Figura 22: Requisitos de granulometría de la Organización Internacional de Normalización (ISO) para el agregado fino, regido por la ASTM C33

MALLA	PORCENTAJE QUE PASA
3/8"	100
Nº4	95-100
Nº8	80-100
Nº16	50-85
Nº30	25-60
Nº50	10-30
Nº100	2-10

### 4. Módulo de finura

El MF, es un índice para determinar características granulométricas de los agregados, se define como el número que se obtiene al dividir por 100 la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie normalizada, los cuales son No.100, 50, 30, 16, 8 y 4. El valor aumenta cuando el agregado contiene granos más gruesos, y decrece cuando sus granos disminuyen de tamaño. El agregado fino deberá tener un módulo de finura que no sea menor de 2.3 ni mayor de 3.5 (Universidad de Centroamérica, s.f).

Figura 23: Ecuación de módulo de finura

No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, 3/8", 3/4", 1 1/2", 3" y de 6"

y el módulo de finura será:

$$MF = \frac{\sum \%retenido\_acumulado(6''+3''+1\frac{1}{2}''+\frac{3}{4}''+\frac{3}{8}''+N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

(Universidad de Centroamérica, s.f)

Existe una separación que ayuda a poder entender el tipo de agregado que se tiene dependiendo de su módulo de finura. El cual se encuentra a continuación:

Figura 24: Parámetros de módulo de finura

Arena gruesa	2.5 a 3.5
Arena fina	1.5 a 2.5
Arena muy fina	0.5 a 1.5

(Universidad de Centroamérica, s.f)

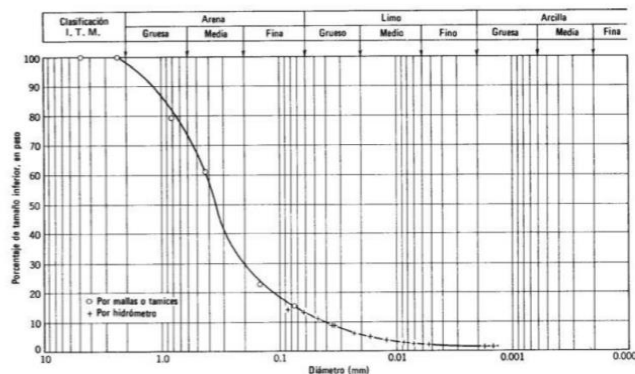
### 5. Tamaño máximo

Se define como la abertura del menor tamiz, por el cual pase el 100% o el mayor porcentaje de la muestra del agregado (Universidad de Centroamérica, s.f).

### 6. Curva granulométrica

Son gráficas que representan por medio de dos ejes perpendiculares entre sí, horizontal y vertical, en donde las ordenadas representan el porcentaje que pasa y en el eje de las abscisas la abertura del tamiz cuya escala es logarítmica. Las curvas granulométricas permiten visualizar mejor la distribución de tamaños dentro de una masa de agregados y permite conocer además que tan grueso o fino es (Universidad de Centroamérica, s.f)

Figura 25: Ejemplo de una curva granulométrica



(Universidad de Centroamérica, s.f)

### J. ASTM

ASTM International, anteriormente conocida como la American Society for Testing and Materials, es una organización de estándares que desarrolla y publica normas técnicas consensuadas de manera voluntaria para una amplia variedad de materiales, productos, sistemas y servicios. Fundada en 1902, su sede se encuentra en West Conshohocken, Pennsylvania, y cuenta con más de 30,000 miembros de más de 140 países (ASTM International, s.f.).

### Historia y evolución

La organización fue creada en 1898 por un grupo de científicos e ingenieros para abordar problemas de calidad en la industria ferroviaria, específicamente en relación con la rotura de rieles. A lo largo de los años, ASTM ha ampliado su enfoque para incluir una variedad de industrias, desarrollando actualmente

más de 12,500 normas que son utilizadas globalmente para mejorar la calidad de productos y servicios, así como la salud y seguridad (ASTM International, s.f.).

### Funciones y normas

ASTM no tiene autoridad para exigir el cumplimiento de sus normas sin embargo, estas pueden volverse obligatorias cuando son referenciadas en contratos o regulaciones gubernamentales. Los estándares de ASTM abarcan diversas áreas, incluyendo metales, plásticos, productos para consumidores, dispositivos médicos y más. Su proceso de desarrollo de normas es abierto y transparente, permitiendo la participación de individuos y gobiernos en la creación de estándares globales consensuados (ASTM International, s.f.).

### Importancia global

ASTM International se ha convertido en un líder en el desarrollo de normas internacionales, contribuyendo significativamente a la normalización en diversas industrias y apoyando el comercio global. Su enfoque en la calidad y la seguridad ha hecho que sus normas sean un componente integral de las estrategias comerciales competitivas en todo el mundo (ASTM International, s.f.).

#### 1. ASTM C33

La ASTM C33, oficialmente conocida como C33/C33M-18, es una norma que especifica los requisitos para los agregados de concreto, tanto finos como gruesos. Esta norma es fundamental en la industria de la construcción, ya que define criterios de calidad y clasificación para garantizar que los materiales utilizados en la mezcla de concreto cumplan con estándares de rendimiento y durabilidad (Matest, s.f.).

La norma ASTM C33 establece las especificaciones para:

- Grado y calidad de los agregados: Incluye requisitos para la granulometría y la calidad de los agregados, excluyendo los agregados ligeros o pesados.
- Métodos de prueba: Proporciona métodos de ensayo para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, como la densidad, la resistencia a la degradación y la presencia de impurezas orgánicas (Matest, s.f.).

### Importancia en la construcción

El uso de agregados que cumplen con ASTM C33 es crucial para la producción de concreto de alta calidad, lo que a su vez influye en la resistencia y durabilidad de las estructuras construidas. La norma es ampliamente adoptada en proyectos de construcción en Estados Unidos y en otros países, y su cumplimiento puede ser un requisito en contratos y regulaciones gubernamentales. La norma ASTM C33 ha sido revisada y actualizada periódicamente, con la última edición aprobada en 2018. Estas revisiones aseguran que la norma se mantenga relevante y alineada con las mejores prácticas y avances técnicos en la industria de la construcción (Matest, s.f.).

#### 4.8.2 Normas COGUANOR provenientes de la ASTM C33

En Guatemala, las normas COGUANOR regulan las especificaciones y requisitos para el cemento, asegurando que los materiales utilizados en la construcción cumplan con estándares de calidad y seguridad. A continuación, se destacan algunas de las normas relevantes:

- Normas COGUANOR para el Cemento COGUANOR NGO 41 005: Esta norma se refiere al cemento Portland, estableciendo clasificaciones y especificaciones que deben cumplir los diferentes tipos de cemento. Incluye requisitos sobre la resistencia mecánica, finura, y otros parámetros fundamentales para asegurar la calidad del cemento utilizado en construcciones.
- NTG 41095: Esta norma especifica los requisitos para los cementos hidráulicos, basándose en la norma ASTM C1157/C1157M-17. Incluye especificaciones por desempeño y requisitos de certificación para los cementos comercializados en Guatemala, tanto de producción nacional como importados. Esta norma fue aprobada en agosto de 2018 y sustituye a versiones anteriores.
- NTG 41068: Relacionada con el concreto premezclado, esta norma establece especificaciones equivalentes a la norma ASTM C94/C94 M-09. Su objetivo es regular la calidad del concreto premezclado en el país, incluyendo aspectos como la dosificación y el manejo del material (CONRED, s.f).

### Importancia de las normas

Las normas COGUANOR son esenciales para garantizar que los materiales de construcción sean seguros y eficaces. Aseguran que el cemento utilizado en proyectos de construcción cumpla con estándares internacionales, lo que es crucial para la durabilidad y seguridad de las estructuras (CONRED, s.f).

### 2. Norma COGUANOR NTG 41063

La norma COGUANOR NTG 41063 establece las especificaciones para los agregados livianos destinados a ser utilizados en la fabricación de unidades de mampostería de concreto cuando el objetivo principal es reducir la densidad del material.

Algunos puntos clave de esta norma:

- Está basada en la norma ASTM C331/C331M y fue adoptada por el Consejo Nacional de Normalización de Guatemala.
- Clasifica los tipos de agregados livianos permitidos, como arcilla expandida, pizarra expandida, esquisto expandido, entre otros.
- Especifica los requisitos físicos y químicos que deben cumplir estos agregados, como límites en la absorción de agua, densidad aparente suelta, contenido de materia orgánica, etc.
- Incluye tablas con los requisitos granulométricos para los diferentes tipos de agregados livianos.
- Tiene como objetivo principal establecer estándares de calidad para estos agregados especiales, con el fin de asegurar la durabilidad y propiedades adecuadas de las unidades de mampostería de concreto fabricadas con ellos.

(CONRED, s.f)

### 3. Norma ACI 523.3R-14

La norma ACI 523.3R-14, titulada "Guide for Cellular Concretes Above 800 kg/m<sup>3</sup> (50 lb/ft<sup>3</sup>)", es un documento publicado por el American Concrete Institute (ACI) que proporciona directrices sobre el uso y las propiedades de los concretos celulares que tienen una densidad superior a 800 kg/m<sup>3</sup> (50 lb/ft<sup>3</sup>)

Esta norma es fundamental para ingenieros y arquitectos que trabajan con este tipo de materiales en la construcción (Sidekick, s.f.)

### Contenido y propósitos

- **Definición y clasificación:** La norma define qué se entiende por concreto celular y clasifica los diferentes tipos de mezclas y sus aplicaciones.
- **Propiedades Físicas y mecánicas:** Se discuten las propiedades que deben cumplir los concretos celulares, incluyendo la resistencia a la compresión, la durabilidad y la conductividad térmica.
- **Recomendaciones de diseño:** Proporciona recomendaciones sobre el diseño de mezclas, métodos de producción y consideraciones para el uso en obras de construcción.
- **Aplicaciones:** La norma detalla las aplicaciones típicas de los concretos celulares, que incluyen su uso en elementos estructurales, sistemas de aislamiento y aplicaciones en construcción sostenible.
- **Pruebas y Certificaciones:** Incluye información sobre los métodos de prueba necesarios para verificar las propiedades del concreto celular y asegurar que cumpla con los estándares establecidos (Sidekick, s.f.)

### Importancia

El ACI 523.3R-14 es crucial para garantizar que los concretos celulares se utilicen de manera efectiva y segura en la construcción, ayudando a los profesionales a entender mejor cómo estos materiales pueden ser integrados en proyectos arquitectónicos y de ingeniería. Además, promueve prácticas de construcción más sostenibles al facilitar el uso de materiales que pueden ofrecer ventajas en términos de aislamiento y eficiencia energética.

*Figura 26: Parámetros del ACI 523.3R-14 para la resistencia a la compresión típica para cemento celular*

Densidad de fundición, lb/fts (kg/m³)	Resistencia a la compresión típica de 28 días, psi (MPa)
50 (800)	250 a 400 (1,7 a 2,8)
65 (1040)	400 a 550 (2,8 a 3,8)
80 (1280)	600 a 750 (4.1 a 5.1)
95 (1520)	800 a 1100 (5,5 a 7,6)
110 (1760)	1300 a 1600 (9,0 a 11,0)

(Sidekick, s.f.)

### K. Celulosa aplicada en construcción

Uno de los principales aportes de la celulosa en la construcción es la de funcionar como un aislante térmico y acústico. La celulosa proporciona un aislamiento que combina la protección térmica, acústica, control de condensación y protección al fuego. Es el aislamiento más competitivo del mercado en términos económicos porque su materia prima es abundante y poco costosa (Barriaga, 2023).

En la actualidad, existen algunas implementaciones generadas por empresas. Estas son:

- **Paneles aislantes flexibles de celulosa:** posee propiedades de regulador de temperatura y humedad. Es un aislante acústico y resistente al fuego.

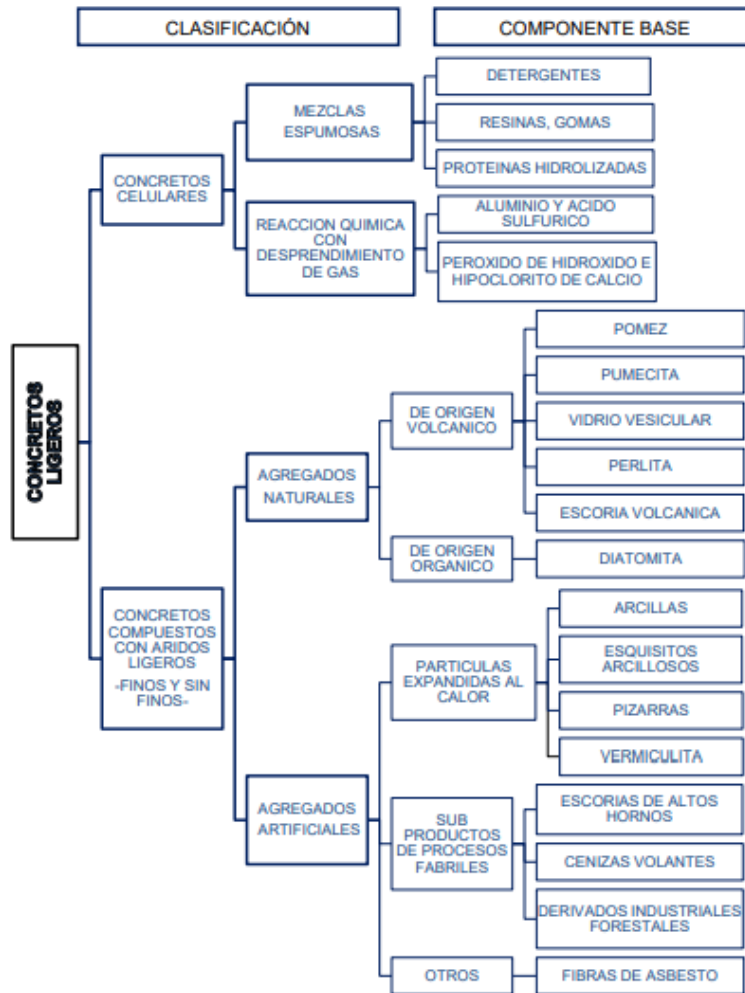
- Aislante térmico de celulosa: es un aislante elaborado con papel periódico reciclado que posee propiedades térmicas.
- Panel de celulosa y yeso: es un panel elaborado con fibra de celulosa reciclada, agua y yeso, prensado a alta tensión. El panel resultante logra resistir golpes, humedad y fuego, además de servir como un buen aislante acústico (Barriaga, 2023).

También se utiliza en un tipo de planchas de fibrocemento, el cual es un material constructivo compuesto por cemento, arena, fibras de celulosa y aditivos especiales. Estos tipos son:

1. Volcanboard: es una placa lisa de fibrocemento, recomendada para revestir fachadas de todo tipo de edificaciones, es óptima para pisos y entresijos en zonas secas y húmedas. Es un elemento incombustible, resistente a la humedad, fácil de trabajar y tiene una gran durabilidad (Barriaga, 2023).
2. Volcanpanel: es un tablero con textura de madera de fácil y rápida instalación, es incombustible y resistente a la humedad.
3. Volcanpanel ranurado: es un tablero de fibrocemento para usos de revestimiento exterior o interior de muros, aleros y frontones. Es un producto 100% incombustible, con total resistencia a la humedad e incapaz de pudrirse (Barriaga, 2023).

Por último, están los recipaneles. Los cuales están compuestos por papel periódico y cemento Portland blanco. Se buscaba que estos paneles fueran económicos, además de tener buenas propiedades mecánicas y las dimensiones comerciales para su uso en muros tabiques y en cielos falsos en la industria de la construcción. Estos tienen un bajo peso y alta resistencia a la flexión. Además de una baja conductividad térmica, por lo que sería conveniente utilizar los recipaneles en edificaciones ubicadas en zonas donde ocurran cambios drásticos de temperaturas. (Barriaga, 2023).

Figura 27: Clasificación de los concretos ligeros



(Yok, 2018)

#### L. Fibras de celulosa

Las fibras de celulosa son componentes esenciales de las paredes celulares de las plantas, constituyendo un biopolímero abundante y biodegradable. Se obtienen principalmente de la madera, la corteza y las hojas de diversas plantas, y pueden contener también hemicelulosa y lignina, lo que influye en sus propiedades mecánicas (Dical, s.f).

#### Tipos de fibras de celulosa

- Fibras naturales

Estas fibras se extraen de las plantas y mantienen su forma original. Ejemplos incluyen el algodón y el lino, que son reconocibles por su apariencia natural. Estas fibras son procesadas mínimamente para eliminar impurezas (Dical, s.f).

- Fibras manufacturadas

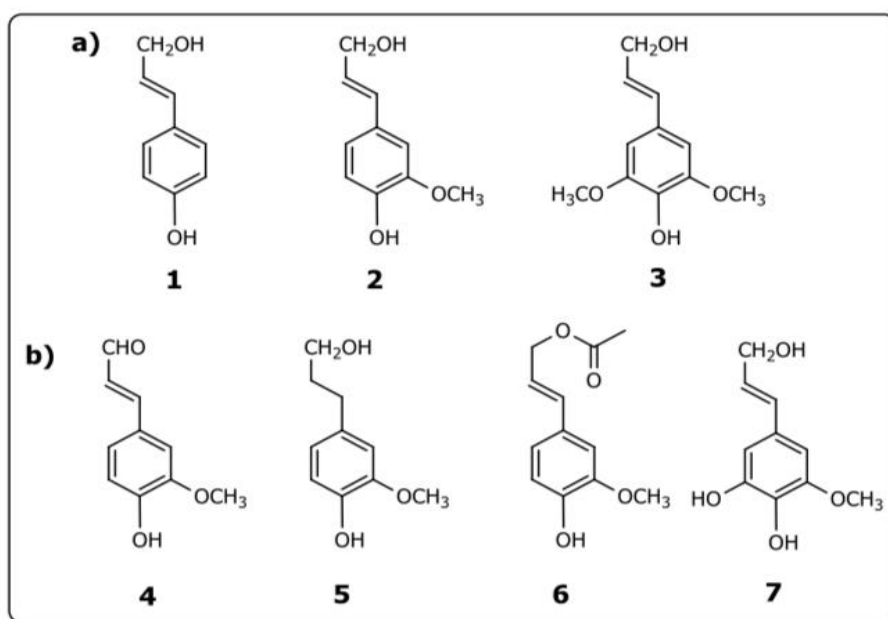
Las fibras de celulosa manufacturadas se producen a partir de pulpas vegetales que son tratadas químicamente para formar filamentos. Un ejemplo común es el rayón, que se elabora a partir de pulpa de madera (Dical, s.f).

En el proceso de producción de celulosa química la mayor parte de la lignina se remueve por disolución con agentes químicos, evitando que el papel final se vuelva amarillo por oxidación de la lignina. Para eliminar la lignina se realiza un proceso de cocción química de la madera (astillas) a altas temperaturas y presiones. Dependiendo de los compuestos químicos usados en la cocción, existen celulosas químicas kraft o al sulfato y celulosas al sulfito. Actualmente la producción de pasta de celulosa al sulfato es la más utilizada a nivel mundial. El proceso al sulfito requiere un medio ácido y es muy contaminante, por lo que prácticamente no se utiliza en la actualidad (Universidad de Valladolid, s.f).

### 1. Liguina

Las plantas terrestres vasculares producen lignina con el fin de resolver problemas debidos a los estilos de vida terrestres. La lignina ayuda a evitar que el agua impregne la pared celular, lo que ayuda a la conducción del agua en la planta. La lignina agrega soporte, puede ayudar a “soldar” celdas entre sí y proporciona rigidez para resistencia contra las fuerzas que causan la flexión, como el viento. La lignina está compuesta por monómeros aromáticos ramificados reticulados, los cuales son: alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico. El alcohol p-cumarílico es un componente menor de las ligninas tipo pasto y forraje. El alcohol coniferílico es el monómero de lignina predominante que se encuentra en las maderas blandas Tanto los alcoholes coniferílicos como los sinapílicos son los bloques de construcción de la lignina de madera dura (Chavez-Simonte, 2013)

Figura 28: Tipos de monolignoles más comunes encontrados en los bloques de construcción de la liguina (a) y otro tipos de monolignoles (b)

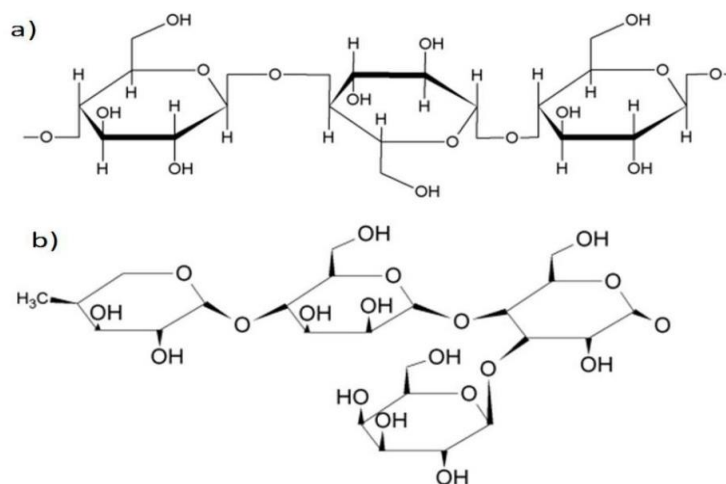


(Chavez-Simonte, 2013)

## 2. Hemicelulosa

En lugar de ser un polímero típico donde las unidades se repiten una y otra vez, la hemicelulosa es un heteropolímero. Tiene una estructura aleatoria, amorfa con poca resistencia. Tiene múltiples unidades de azúcar en lugar de la unidad de glucosa que hemos visto para almidón y celulosa, y el número promedio de unidades de azúcar es 500-3000 (unidades de glucosa con el almidón y la celulosa). Las unidades monoméricas incluyen: unidades de xilosa, manosa, galactosa, ramosa y arabinosa (Química.es, s.f).

Figura 29: Estructura molecular de la celulosa (a) comparado la hemicelulosa (b)

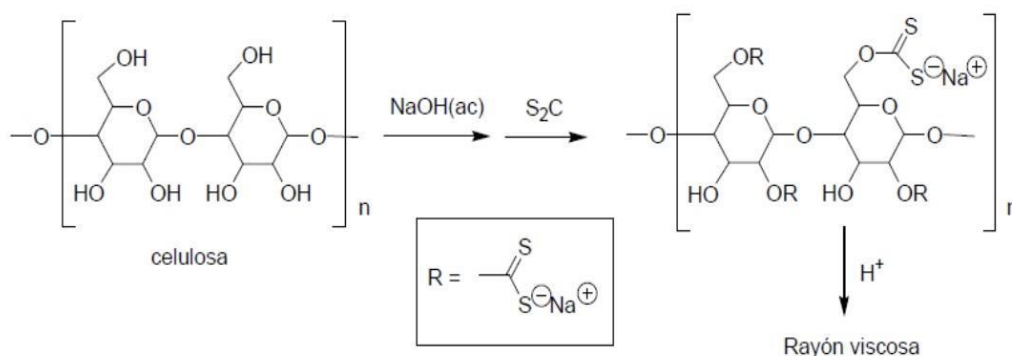


(ResearchGate, s.f)

### M. Métodos de obtención de celulosa

La celulosa recibe distintos tratamientos para poder utilizarla como fibra en la industria textil. La celulosa no se puede hilar por fusión ya que se descompone y carboniza antes de fundir. En la preparación de la fibra denominada viscosa las fibras de celulosa se tratan con distintas disoluciones de sosa y S<sub>2</sub>C dependiendo el método. La sosa produce rotura de cadenas de celulosa dando una celulosa de menor peso molecular. El xantato de celulosa así obtenido es una masa viscosa que se hace pasar a través de unos orificios de platino (hilado en húmedo). Las fibras resultantes se coagulan en un baño que contiene H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y ZnSO<sub>4</sub> y así se obtiene una celulosa regenerada con una superficie brillante y sedosa. Las fibras obtenidas se estiran hasta 30 veces su longitud original, se recogen en bobinas y se secan para eliminar el disolvente (agua). Las fibrillas se tuercen y se estiran en haces, formando hilos (Universidad de Valladolid, s.f).

Figura 30: Mecanismo de reacción del método a la sosa de obtención de celulosa



(Universidad de Valladolid, s.f)

### Método Kraft (o alcalino)

El método Kraft, también conocido como despulpado al sulfato, es uno de los procesos más utilizados para la producción de celulosa, representando aproximadamente el 72% de la producción mundial de este material. Este método fue desarrollado en 1887 por Carl Dahl y se basa en la cocción en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S).

Primero se da la cocción donde la biomasa se cocinan a altas temperaturas y presiones en el licor blanco (la mezcla de NaOH y Na<sub>2</sub>S). Este tratamiento químico descompone la lignina, el polímero que une las fibras de celulosa, permitiendo su separación. Esto produce la deslignificación a través del ataque alcalino, la lignina se fragmenta en compuestos más pequeños que son solubles, lo que facilita el desfibrado sin necesidad de un tratamiento mecánico adicional. Este proceso tiene un rendimiento del aproximadamente del 50-60%, lo que significa que se obtiene entre media tonelada y tres quintas partes de pulpa por cada tonelada de biomasa (Universidad de Valladolid, s.f).

Como ventajas se tiene que produce una pulpa resistente, adecuada para la fabricación de papel. Además, permite la recuperación y reutilización de productos químicos, lo que mejora la eficiencia del proceso. Pero genera olores desagradables debido a la emisión de tioles y sulfuros y puede tener un impacto ambiental significativo si no se manejan adecuadamente los efluentes (Universidad de Valladolid, s.f).

### Método sulfito

El método sulfito es otro proceso histórico para la obtención de celulosa, aunque ha disminuido su uso en comparación con el método Kraft. Este proceso utiliza un medio ácido, generalmente sales de sulfito, para disolver la lignina y separar las fibras de celulosa.

Este proceso también empieza con la cocción la biomasa se trata con una solución ácida que contiene bisulfito o sulfito, lo que permite la disolución de la lignina. Aunque este método también permite obtener pulpa, su rendimiento es inferior al del método Kraft y puede ser menos eficiente en términos de consumo de materia prima (Universidad de Valladolid, s.f).

Este método produce una pulpa más clara en comparación con el método Kraft, lo que puede ser beneficioso para ciertos tipos de papel. Pero es menos eficiente y más contaminante que el proceso Kraft, lo que ha llevado a su disminución en uso industrial (Universidad de Valladolid, s.f).

### Método a la sosa

Este es un tipo de proceso en el cual no se utiliza ningún tipo de sulfato. En la preparación de la fibra denominada viscosa las fibras de celulosa se tratan con una disolución de sosa y luego agua. La sosa, es un componente comercial de hidróxido de sodio, el cual produce rotura de cadenas de celulosa dando una celulosa de menor peso molecular. Este es un proceso artesanal, ya que estos reactivos pueden ser adquiridos localmente y son de bajo costo (Universidad de Valladolid, s.f).

Proceso:

1. Preparación: Se prepara una solución de sosa cáustica con una concentración que generalmente varía entre el 2% y el 12% en peso, siendo comúnmente utilizada una concentración del 10%.
2. Alcalinización: La biomasa se sumerge en esta solución, donde el NaOH actúa sobre la lignina, degradándola y permitiendo que las fibras de celulosa se separen.
3. Extracción: Tras un tiempo de reacción, se filtra la mezcla para recuperar la pulpa de celulosa, que puede ser purificada posteriormente.
4. Lavado en agua: Después del proceso de alcalinización mediante el método a la sosa, es fundamental realizar un lavado en agua para eliminar los residuos de hidróxido de sodio y otros compuestos solubles que puedan haber quedado en la pulpa.

#### 1. Rendimiento del método a la sosa

Se refiere al porcentaje de fibra recuperada después de la extracción con hidróxido de sodio y para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación.

*Figura 31: Ecuación de rendimiento celular*

$$\text{Rendimiento de fibra de celulosa \%} = (X / P)100$$

(Lopez-Martinez, s.f)

#### 2. Aplicaciones de fibras manufacturadas

Las fibras de celulosa son conocidas por su resistencia mecánica y su capacidad de formar enlaces de hidrógeno, lo que les confiere propiedades únicas como baja solubilidad en agua. Esto las hace ideales para diversas aplicaciones, incluyendo:

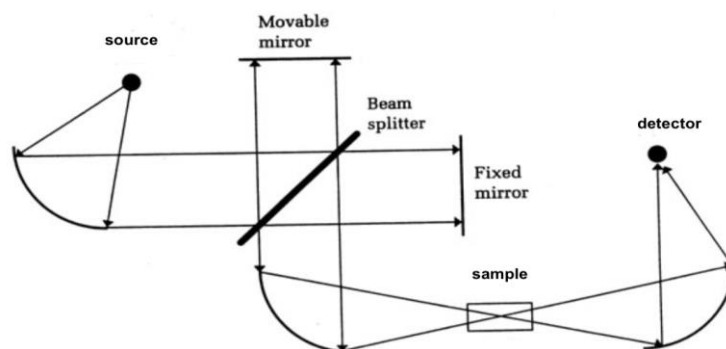
- Industria textil: Utilizadas en la fabricación de tejidos y ropa.
- Papel y cartón: Constituyen la materia prima fundamental para la producción de papel, donde se utilizan tanto fibras largas como cortas para diferentes tipos de productos.
- Aislantes térmicos: Se emplean en la construcción como material aislante ecológico.
- Cosmética y alimentación: Usadas como espesantes y en la creación de geles.

## N. Espectroscopia infrarroja

La espectroscopía infrarroja (IR) es una técnica analítica que mide la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra para obtener información sobre su composición química. Se fundamenta en el hecho de que la mayoría de las moléculas absorben la luz en la región infrarroja del espectro electromagnético cuando la energía incidente es igual a la necesaria para que se dé una transición vibracional de la molécula.

Cuando una molécula absorbe radiación IR, comienza a vibrar de una determinada manera gracias a la energía suministrada. Cada molécula presenta un espectro IR característico (huella dactilar), debido a que todas las moléculas (excepto las especies diatómicas homonucleares) tienen modos vibracionales únicos. Analizando las longitudes de onda que absorbe una sustancia en la zona del infrarrojo, se puede obtener información acerca de los grupos funcionales y enlaces presentes en dicha sustancia. La espectroscopía IR se utiliza comúnmente para analizar muestras con enlaces covalentes en estado sólido, líquido o gaseoso. Es una técnica versátil que permite estudiar prácticamente cualquier tipo de muestra con independencia de su estado físico. Los espectros IR se obtienen pasando un haz de luz infrarroja a través de la muestra y midiendo la energía absorbida en cada frecuencia (Politécnica de Cartagena, s.f).

Figura 32: Partes de la espectrofotómetro infrarrojo (IR)



(Politécnica de Cartagena, s.f)

## O. Azul de metileno

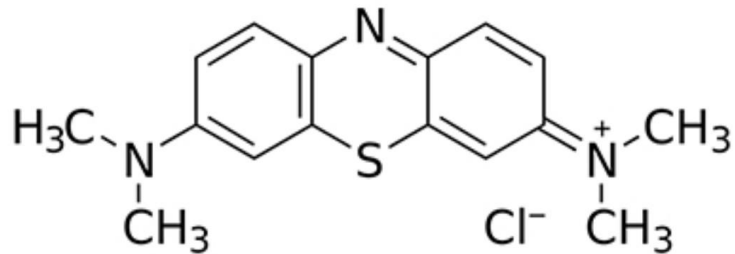
El azul de metileno, o cloruro de metiltionina, es un colorante orgánico. Se presenta como cristales de color verde oscuro y es inodoro. Su fórmula química es  $C_{16}H_{18}ClN_3S$ . Es estable al aire. Sus soluciones en agua o en alcohol son de color azul profundo. Es fácilmente soluble en el agua y en cloroformo; también es moderadamente soluble en alcohol (Ritchie, J. M., & McKernan, 2019).

### Aplicaciones

- Medicina: El azul de metileno se usa como tinte para teñir ciertas partes del cuerpo antes o durante la cirugía. Su uso es principalmente como antiséptico y cicatrizante interno. También se utiliza como colorante en las tinciones para la observación en el microscopio.

- Acuicultura: Se usa en acuicultura por los hobbistas de peces tropicales para tratar las infecciones fúngicas. También puede ser efectivo para tratar peces infectados con el parásito protozoa *ich*: *Ichthyophthirius multifilii* (Ritchie, J. M., & McKernan, 2019).

Figura 33: Estructura del azul de metileno



(Boletín de Anestesiología, 2013)

Figura 34: Propiedades de azul de metileno

Azul de metileno	
<b>Nombre químico</b>	3,7-bis (dimetilamino)- Cloruro d fenazationio Cloruro de tetrametilitionina chloride
<b>Fórmula química</b>	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> N <sub>3</sub> ClS
<b>Masa molecular</b>	319,85 g/mol
<b>Número CAS</b>	[61-73-4]
<b>Número EC</b>	200-515-2
<b>Densidad</b>	? g/cm <sup>3</sup>
<b>Punto de fusión</b>	100 °C
<b>Punto de ebullición</b>	Se descompone
<b>SMILES</b>	CN(C)c3ccc2nc1ccc(N(C)C)cc1[s+](c2c3.[Cl-])
Disclaimer and references	

(Boletín de Anestesiología, 2013)

### 1. Absorbancia del azul de metileno por la celulosa

El azul de metileno es un colorante catiónico que puede ser absorbido por la celulosa debido a varias razones:

- Interacciones electrostáticas: La celulosa, al estar en un medio acuoso, puede presentar carga negativa en algunos de sus grupos hidroxilo debido a la ionización. El azul de metileno, al ser un colorante catiónico, es atraído electrostáticamente por los grupos cargados negativamente de la celulosa. Esto facilita la adsorción del colorante sobre la superficie de la celulosa.
- Formación de enlaces de hidrógeno: Los grupos hidroxilo de la celulosa pueden formar enlaces de hidrógeno con los átomos de nitrógeno del anillo heterocíclico del azul de metileno. Estos

enlaces de hidrógeno adicionales ayudan a estabilizar la interacción entre el colorante y la celulosa.

- Afinidad química: Existe cierta afinidad química entre el colorante y la celulosa que favorece la adsorción. Los electrones  $\pi$  del anillo aromático del azul de metileno pueden interactuar con los electrones de los enlaces glicosídicos de la celulosa (Castellar, 2013).

## P. Absorbancia

La absorbancia es una medida que cuantifica la cantidad de radiación absorbida por una muestra al atravesarla, y se relaciona directamente con la concentración y el grosor de la muestra. La medición de la absorbancia se realiza con un espectrofotómetro, que emite luz a una longitud de onda específica y mide la intensidad de la luz que pasa a través de la muestra. (Molecular Devices, s.f).

$$A = \log_{10}\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Esta técnica es fundamental en análisis químicos y biológicos, permitiendo determinar concentraciones mediante la Ley de Beer-Lambert. Se define como:

$$A = \epsilon cl$$

### 1. Tipos de espectrofotómetros

En la actualidad existen diferentes tipos de espectrofotómetros, a continuación, se mencionan y detallan las características más resaltantes:

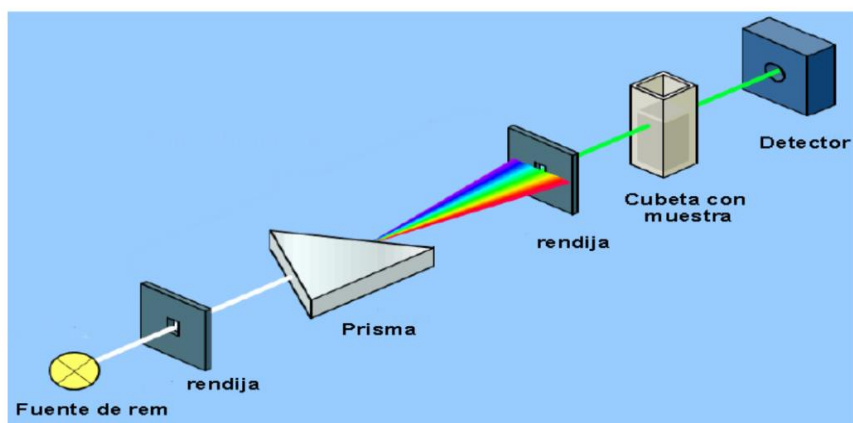
- Espectrofotómetro de haz simple: La luz se transporta desde la muestra al detector, por lo que se necesita una referencia para desarrollar el análisis.
- El espectrofotómetro de haz dividido: La luz se divide en dos trayectorias, la que pasa por el monocromador hacia la muestra y luego al detector, y la que pasa hacia el detector que se usa para corregir las variaciones de la luz que emite la lámpara.
- Espectrofotómetro de doble haz: La luz viaja por medio de dos trayectorias hacia los compartimentos, y cada uno tiene su propio detector. Uno se dirige a la muestra y el otro a la referencia.
- Espectrofotómetro de absorción atómica: Este tipo de espectrofotómetro trabaja tomando en cuenta las longitudes de onda del espectro de radiación electromagnética. Estos se basan en que las moléculas que absorben las frecuencias forman parte de las características de su estructura.
- Espectrofotómetro UV visible: Tiene como objetivo medir la luz que pasa por medio de la muestra, para luego compararla con su intensidad antes que pase por alguna solución o muestra (Labprocess, s.f.).

### Partes de un espectrofotómetro

Un espectrofotómetro por lo general está compuesto por cuatro partes principales: una fuente, un monocromador, un divisor del haz, un área de muestra y un detector. También posee elementos ópticos como lentes o espejos, que transmiten la luz a lo largo de todo el equipo.

- Fuente de luz: La misma ilumina la muestra. Debe cumplir con las condiciones de estabilidad, direccionalidad, distribución de energía espectral continua y larga vida. Las fuentes empleadas son lámpara de tungsteno y lámpara de arco de xenón. Se pueden clasificar en continuas y lineales, y también en continuas o pulsantes.
- Monocromador: Es un dispositivo que permite obtener luz monocromática, es decir aísla las radiaciones de longitud de onda deseada que inciden o se reflejan desde el conjunto. Está constituido por las rendijas de entrada y salida, colimadores y el elemento de dispersión.
- Fotodetectores: El detector es quien detecta la radiación, y a su vez pasa esta señal a un registrador. En los instrumentos modernos se encuentra una serie de 16 fotodetectores para percibir la señal en forma simultánea en 16 longitudes de onda, cubriendo el espectro visible.
- Registrador: Es el encargado de convertir el fenómeno físico, es decir la señal que se obtiene en números proporcionales al analito en cuestión (Química orgánica, s.f).

*Figura 35: Partes de un espectrofotómetro*



(Química orgánica, s.f)

## V. ANTECEDENTES

“En este estudio se realizó la caracterización fisicoquímica del cuesco y fibra obtenidos del procesamiento de palma africana con el fin de determinar las condiciones óptimas para un aprovechamiento eficiente de la energía en el proceso de combustión en calderas de biomasa. Los residuos de cuesco y fibra se obtuvieron de una empresa palmicultora ubicada en la región costa del Ecuador. Se realizaron los siguientes ensayos: contenido de cenizas, humedad, análisis granulométrico, densidad y poder calórico. De los análisis de laboratorio, se obtuvieron resultados de humedad, poder calórico y porcentaje de cenizas dentro del rango necesario para una combustión eficiente. En el análisis granulométrico se determinó la distribución de tamaños del cuesco y se realizaron pruebas de fluidizado en un secador de lecho fluido con el fin de observar el comportamiento de las partículas de cuesco y fibra en la columna de fluidización. Se realizaron pruebas de fluidizado utilizando un porcentaje determinado de cuesco y fibra. En las pruebas de fluidización se observó que no es posible obtener una mezcla homogénea del cuesco y la fibra; como consecuencia, la combustión en calderos será menos eficiente ” (Paucar, 2021)

“El propósito principal de la presente investigación fue el diseño de bloques de concreto celular con la adición de fibra sintética el cual tiene que cumplir con la normativa peruana para su elaboración determinado las propiedades tanto físicas como mecánicas del bloque, donde se terminó una población de 108 bloques. Los agregados utilizados fueron: agregado fino de la cantera de Yapatera – Chulucanas, Cemento Pacasmayo MS, aditivo incorporador de aire sikaAer y fibra sintética SikaFiber. La muestra para los estudios que se realizó fue de 09 bloques en relación de: 3 bloques cada 7 días, 3 bloques cada 14 días y 3 bloques cada 28. esto con una distribución de la dosificación de fibra sintética, (bloques de concreto celular convencional, bloques de concreto celular con fibra sintética al 0.20%, 0.30% y 0.60% en relación al peso del cemento). analizamos el diseño y las dosificaciones obtenidas para poder determinar la dosificación más apropiada, obteniendo que el bloque de concreto celular con fibra sintética al 0.30% era la dosificación más apropiada por los rangos de fluidez más apropiada para una mayor trabajabilidad y resistencia óptima casi cerca de los valores del diseño del bloque con 0.60% de fibra. Además de la determinación de la rentabilidad del bloque de concreto celular con fibra sintética en relación con un bloque de concreto celular convencional, obteniendo resultados favorables ya que el porcentaje del aumento de fibra sintética no varía mucho el precio en función a un bloque. ” (Coveñas, 2019)

“En esta investigación experimental se desarrolló el uso de concreto celular de espuma preformada, teniendo como agregado principal arena pómez, material local abundante en la ciudad de Guatemala, para fabricar unidades demampostería, con el objeto de presentar este material como una opción más al productor de prefabricados. Se ha utilizado documentos bibliográficos para respaldar lo desarrollado y conocer el panorama general sobre la composición de concretos celulares, para hacer un análisis de los materiales propuestos para este concreto especial. El estudio consistió en determinar una proporción de mezcla con base en el reporte del comité ACI 523.3R-14, evaluando las principales propiedades de las

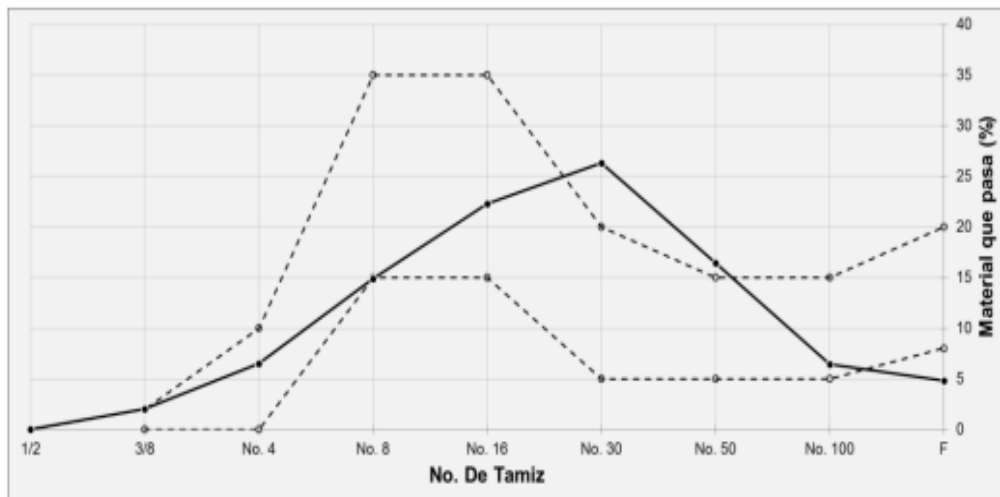
mezclas y realizando ensayos de laboratorio sobre el concreto en estado fresco y en estado endurecido, basados en especificaciones de los normativos NTG y ASTM; seguidamente, con la mezcla que cumplió con las especificaciones, se fabricó artesanalmente bloques de mampostería, evaluando su resistencia a la compresión y porcentaje de absorción de agua. Los resultados establecen un material con características provechosas para ser utilizado en prefabricados, debido a su desempeño mecánico y su apariencia física, de la misma forma la metodología de fabricación favorece el uso del material en el sitio de obra por su fácil colocación. Desde luego, este trabajo expone datos experimentales puntuales, por ello la seguridad en el uso del material se da de manera restringida” (Yok, 2018).

Figura 36: Mezclas distintas con su resistencia y densidad respectiva de la piedra pómez

Identificación de mezcla	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )		Resistencia a compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> ) (lb/pulg <sup>2</sup> ;psi)		Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	
	Teórico	Real			Teórico	Real
Mezcla A	1552	1565	36.32	516.67	1387	1390
Mezcla B	1380	1500	39.83	566.67	1233	1358
Mezcla C	1207	1300	12.42	176.67	1079	1170
Mezcla D	1035	1245	17.57	250.00	925	1135
Mezcla E	862	1140	2.81	40.00	771	1046

(Yok, 2018)

Figura 37: Análisis granulométrico de la piedra pómez



(Yok, 2018)

Figura 38: Granulometría de la piedra pómez

Tamiz No.	Retenido individual (%)	Retenido Acumulado (%)	Material que pasa (%)	Límites NTG 41063 (material retenido individual)	
				Inferior (%)	Superior (%)
9.5	2.00	2.00	98.00	0.00	2.00
4.75	6.53	8.53	91.47	0.00	10.00
2.36	14.86	23.39	76.61	15.00	35.00
1.18	22.61	46.00	54.00	15.00	35.00
0.6	26.31	72.31	27.69	5.00	20.00
0.3	16.44	88.75	11.25	5.00	15.00
0.15	6.45	95.20	4.80	5.00	15.00
Fondo	4.80	100.00	0.00	8.00	20.00

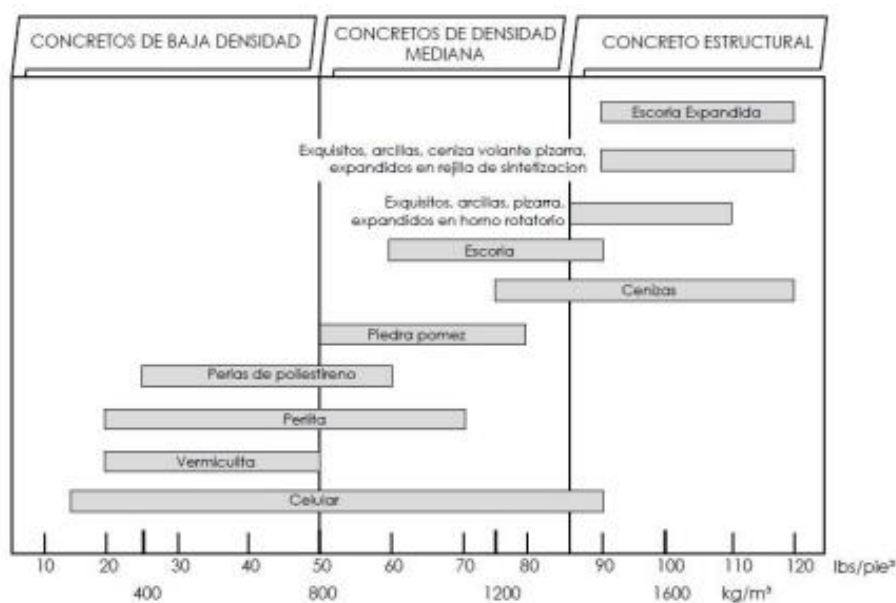
(Yok, 2018)

Figura 39: Aplicaciones del cemento según su densidad

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Aplicaciones usuales
<b>350-600</b>	Entrepisos y entre techos como aislante térmico y acústico.
<b>800-1000</b>	Para prefabricados no portantes, bloques y aislamientos térmicos.
<b>1100 – 1200</b>	Prefabricados portantes y para pisos.
<b>1400 – 1600</b>	Usos estructurales, moldes <i>in situ</i> y premoldeados.
<b>Mayores a 1800</b>	Apto para todo tipo de uso estructural

(Yok, 2018)

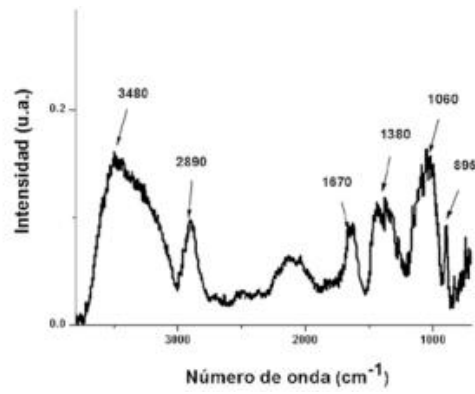
Figura 40: Clasificación de concreto dependiendo de su densidad



(Yok, 2018)

“Los objetivos del trabajo fueron establecer un proceso artesanal para la extracción de celulosa de la paja de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) cosechada en verde, de forma mecánica, y caracterizar su calidad. Se utilizó el método a la sosa y el artesanal, y en este último se utilizaron reactivos de uso industrial. La extracción de fibra de celulosa fue similar en ambos métodos. En el conocido como a la sosa se extrajo la mayor cantidad de pulpa de celulosa (10.02 g) y tuvo un rendimiento de celulosa superior a 6.96 % en comparación con el artesanal. La celulosa extraída de la paja de caña por ambos métodos fue pura, según análisis del FTIR. La cristalinidad de la celulosa de paja fue de 74.78 % a la sosa y 64.24 % con el artesanal, según la técnica de XRD. El tamaño promedio de cristales de la celulosa de paja fue similar en ambos métodos de extracción y es del tipo alfa-celulosa, que puede ser usada para diversos materiales en las industrias farmacéutica y alimenticia” (Garcia, s.f)

Figura 41: Espectroscopia infrarroja de la paja de caña luego de tratarla con el método a la sosa



(Garcia, s.f)

## VI. METODOLOGÍA

### A. Preparación de la muestra inicial (trituración y tamizado):

#### Equipo:

- Secador Honeywell modelo EC 404-6
- Tamizadora WS Tyler modelo RX-29
- Molino de cuchillas
- Balanza analítica Ohaus modelo Pioneer
- Balanza de humedad Ohaus modelo Mb 120
- Balanza Ohaus modelo Valor 3000 xtreme

#### Materiales:

- Bolsas plásticas
- Cinta adhesiva

#### Procedimiento:

- 1) Colocar una bolsa plástica en la descarga del molino y/o trituradora, y fijarla a esta con la cinta adhesiva.
- 2) Conectar el molino asegurándose que no haya ningún material extraño en el mismo y que esté limpio. CUIDADO: no ingresar las manos dentro del molino y/o trituradora.
- 3) Alimentar la muestra de cada tipo de biomasa a la tolva del molino utilizado y llevar a cabo la molienda. Al usar la picadora de martillos, revisar si el molino tiene o no la tapadera inferior colocada, esta tapadera sirve para que la molienda sea más fina. En este caso, utilizarla con la tapadera colocada.
- 4) Tomar la muestra triturada y alimentarla al tamiz superior de la tamizadora de Tyler.
- 5) Pesar previamente cada uno de los tamices vacíos.
- 6) Poner a funcionar la tamizadora por el tiempo establecido para su operación, en este caso se realizó por 20 minutos para asegurarse que se separara toda la muestra.
- 7) Proceder a pesar cada uno de los tamices con parte de la muestra transcurrido el tiempo establecido de operación.

### B. Determinación de la humedad inicial de la muestra:

#### Equipo:

- Balanza analítica Ohaus modelo Pioneer
- Balanza de humedad Ohaus modelo Mb 120
- Balanza Ohaus modelo Valor 3000 xtreme

#### Cristalería:

- Beaker Kimax de capacidad 100 mL
- Vidrio de reloj

#### Procedimiento:

- 1) Conectar la balanza de humedad.
- 2) Abrir la compuerta.
- 3) Asegurarse que el plato de aluminio esté limpio y taralo.

- 4) Poner la muestra en el plato de aluminio, se debe asegurar que la cantidad esté aceptada en el rango de la pantalla, el peso debe de mostrarse en color verde.
- 5) Establecer la temperatura a trabajar, en este caso fue de 65C.
- 6) Cerrar la compuerta.
- 7) Esperar el resultado, cuando la pantalla esté verde apuntar el porcentaje de humedad resultante.
- 8) Cuando esté frío, abrir la compuerta y sacar el resto.

#### C. Determinación del contenido de cenizas de la muestra:

##### Equipo:

- Mufla
- Balanza analítica Ohaus modelo Pioneer

##### Materiales:

- Cápsulas de cerámica
- Guantes
- Pinzas
- Plancha de asbesto

##### Procedimiento:

- 1) Pesar las 4 cápsulas con la biomasa a la que se determinó previamente la humedad y colocarlas dentro de la mufla.
- 2) Empezar el calentamiento a un ritmo que permita alcanzar una temperatura de entre 450 y 500°C en una hora.
- 3) Continuar el calentamiento para alcanzar una temperatura constante de entre 700 y 750°C al alcanzar la segunda hora de calentamiento.
- 4) Continuar el calentamiento a una temperatura constante de entre 700 y 750°C por dos horas adicionales (para hacer un total de 4 horas de calentamiento).
- 5) Retirar las 4 cápsulas de la mufla, con guantes térmicos y pinzas adecuadas para tal fin, dejar enfriar en condiciones graduales que no permitan la absorción de mucha humedad.
- 6) Cuando las 4 cápsulas hayan alcanzado temperatura ambiente proceder a pesarlas.

#### D. Determinación de la capacidad calorífica de la muestra

##### Equipo:

- Bomba calorimétrica Ika modelo C200
- Balanza analítica Ohaus modelo Pioneer

##### Materiales:

- Pinzas
- Recipiente de agua
- Fibra de algodón
- Crisol

### Procedimiento:

- 1) Apertura de la tapa del calorímetro: La tapa del calorímetro se abre manualmente. Para ello se eleva ésta por la muesca de agarre y se lleva hacia arriba hasta que se desliza por sí sola a la derecha hasta una posición tope.
- 2) Encender el calorímetro con el interruptor de encendido y apagado.
- 3) Para calibrar el aparato, es necesario indicar de forma exacta el valor calorífico bruto de la sustancia de calibración utilizada, por lo general, ácido benzoico
- 4) Se selecciona el proceso de medición deseado, el valor predeterminado es isoperibólico.
- 5) Preparación del recipiente de disgregación.
- 6) Preparar el recipiente de disgregación.
- 7) Aflojar la tuerca de racor y quitar la tapa con ayuda del asa.
- 8) Colocar una fibra de algodón en el centro del alambre de ignición y sujetarla con un lazo.
- 9) Pesar la sustancia con una precisión de 0,1 mg directamente en el crisol.
- 10) Anotar el peso e introdúzcalo directamente en el calorímetro.
- 11) Colocar el crisol en el soporte del crisol.
- 12) En caso necesario, introducir agua destilada o una solución en el recipiente de disgregación.
- 13) Orientar la fibra de algodón con una pinza de tal modo, que quede suspendida en el crisol y se introduzca en la muestra. De este modo se garantiza que la fibra ardiente encenderá la muestra durante el proceso de encendido.
- 14) Colocar la tapa en la parte inferior y empujar ésta hasta el tope de dicha parte inferior.
- 15) Colocar la tuerca de racor en la parte inferior y enroscarla manualmente.
- 16) Rellenar el recipiente de disgregación con la estación de oxígeno C 248.
- 17) Introducir el adaptador de encendido en el recipiente de disgregación.
- 18) Utilizar el vaso graduado para introducir aproximadamente 2 litros de agua templada en el depósito
- 19) Al seleccionar MEDICIÓN (F2) se abre el menú "Preparar medición".
- 20) En el cuadro inferior, utilizar el teclado para introducir la pesada que ha anotado, con una precisión de 0,0001 g.
- 21) Cerrar la tapa desplazándola hacia la izquierda desde la posición tope, hasta que se deslice por sí sola hacia abajo. El recipiente de disgregación se contacta mediante el adaptador de encendido con las espigas de encendido. Aparece el mensaje "Llenar".
- 22) Luego la caldera interna se llena de agua (aprox. 70 s). Cuando está llena, la medición comienza de inmediato.
- 23) Una vez terminada la medición, se abre la tapa, de modo que la tapa se vacíe automáticamente.
- 24) Extraer el recipiente de disgregación y retirar el adaptador de encendido.
- 25) El recipiente de disgregación se destensa con el botón de desaireación debajo de una campana de laboratorio, o con la estación de desaireación C 5030.
- 26) Abrir el recipiente de disgregación y revisar el crisol para asegurarse de que la combustión ha sido completa.

## E. Fabricación de morteros:

### Equipo:

- Bomba calorimétrica Ika modelo C200
- Balanza analítica Ohaus modelo Pioneer

### Materiales:

- Agregado de fibra
- Cemento Portland
- Paleta
- Bowl
- Cubeta

### Cristalería:

- Probeta Kimax de 100 mL

### Procedimiento de la mezcla:

- 1) Realizar una mezcla con cemento Portland y el agregado de fibra de palma, dependiendo del tipo de cemento a producir.
- 2) Según las normas Coguanor NTG 41063 para preparar una mezcla de concreto en las proporciones de una parte de cemento y una de agregados combinados en volumen iguales
- 3) Ajustar el contenido de agua de modo de producir un asentamiento deseado.
- 4) En este caso, se agregaron 125 g de cemento y 29 de agregados por cada mortero a producir.
- 5) Agregar 115 ml de agua, ir agregando más hasta que llegue a una consistencia húmeda pero no mojada (son más o menos 34 g de agua por mortero).
- 6) Agregar  $\frac{1}{3}$  en el molde y con la paleta ir haciendo fuerza para que quede todo a la misma altura contando 25 golpes.
- 7) Realizar el mismo proceso con  $\frac{2}{3}$  del molde.
- 8) Llenar el molde y pasar con una espátula la parte de arriba para que quede a la misma altura.
- 9) Esperar 24 horas para desmoldar.
- 10) Para desmoldar se abre con cuidado el molde y se sacan los morteros.

### Procedimiento del secado al aire:

- 1) Luego de desmoldar, se debe de poner en un sitio donde no se mojen.
- 2) Dejar secando al aire por 24 horas.

### Procedimiento de fraguado:

- 1) En una cubeta llena con agua, agregar los cubos al fondo de la cubeta para que estén completamente cubiertos.
- 2) Esperar 7 días.
- 3) Sacarlos de la cubeta.
- 4) Meter al horno por 24 horas a temperatura ambiente.
- 5) Al pasar 24 horas realizar una prueba de resistencia por medio del Test Pilot marca Versa Tester.

#### F. Pruebas de comprensión a la resistencia:

##### Equipo:

- Máquina de ensayo a la compresión Versa test
- Balanza Ohaus modelo Valor 3000 xtreme

##### Procedimiento:

- 1) Se conecta y enciende el equipo.
- 2) El mortero se debe colocar al centro del ensayo.
- 3) Se baja la palanca hasta “load” y se pone en el modo de “controlled rate”.
- 4) Se debe de ir subiendo la fuerza de la compresión al ir girando la manilla que dice “controlled rate” .
- 5) Esperar a que en la pantalla se muestra la fuerza realizada en el ensayo, esto se da cuando el mortero se rompe.
- 6) Apuntar el resultado.

#### G. Prueba de densidad en seco

##### Equipo:

- Balanza analítica Ohaus modelo Pioneer

##### Cristalería

- Erlenmeyer Kimax de 1000 mL

##### Procedimiento:

- 1) Se conecta y enciende la balanza.
- 2) Se pesa el mortero y se anota el resultado.
- 3) Se llena el erlenmeyer con agua y anotar hasta donde se llenó en mL.
- 4) Se coloca el erlenmeyer en la balanza y se tara.
- 5) Se debe de agregar el mortero en el erlenmeyer y se debe asegurar que esté completamente cubierto por el agua.
- 6) Anotar la diferencia entre volúmenes cuando ya esté el mortero en el agua.
- 7) Se realiza el cálculo de densidad, dividiendo el peso del mortero entre el volumen de agua.

#### H. Obtención de la fibra de celulosa:

##### Equipo:

- Balanza analítica Ohaus modelo Pioneer
- Microscopio
- Espectrofotómetro
- Balanza de humedad Ohaus modelo Mb 120
- Shaker
- Tunel de calor Armfield modelo Tray drier

##### Reactivos:

- Azul de metileno
- Agua destilada

#### Cristalería:

- Beaker Kimax 100 ml
- Probeta Kimax 100 ml
- Erlenmeyer Kimax 125 ml
- Beaker Kimax 1L
- Erlenmeyer Kimax 1L
- Vidrio de reloj

#### Procedimiento del método a la sosa:

- 1) En un beaker, pesar 40 gramos de muestra.
- 2) Realizar una solución al 10%, para esto se agregan 1000 mL de agua destilada y 100 gramos de soda cáustica.
- 3) Agregar los 40 gramos de muestra a la solución de soda cáustica.
- 4) Conectar una estufa eléctrica, prenderla y poner a calentar la solución con la muestra a 90 C.
- 5) Se deja calentar hasta que se observa la primera burbuja en la solución.
- 6) Se deja calentar por 10 min más a 90 °C y luego se apaga la estufa
- 7) Posteriormente se deja en reposo por 20 minutos para enfriar y lavar con agua corriente.
- 8) Se enjuaga con agua purificada (pH 7) para posteriormente desfibrar manualmente.
- 9) Se seca en una estufa de aire forzado a 65 °C y se dejó reposar 12 h.

#### Pruebas para confirmar que son fibras de celulosa

- 1) Realizar una solución de azul de metileno al 1%, agregando 1 ml de azul de metileno y 100 ml de agua destilada.
- 2) Tomar la absorbancia de la solución a 6000 nm
- 3) En un Erlenmeyer de 125 mL, agregar 1 gramo de muestra y 100 ml de la solución.
- 4) Esperar por 1 hora.
- 5) Separar la muestra del líquido restante por medio de un filtro.
- 6) Se debe medir la absorbancia de la solución restante.

#### Análisis de absorbancia por medio del espectrofotómetro

- 1) Se conecta y enciende el equipo.
- 2) Colocar la frecuencia a la cual se lee la muestra, en este caso 6000 nm.
- 3) Se abre la tapadera con cuidado y se debe de realizar un blanco con agua destilada.
- 4) Para esto se vierte agua destilada en el vidrio.
- 5) Luego se pone en el área de muestreo.
- 6) Se cierra la compuerta.
- 7) Se toma la medición cuando esta estable.
- 8) Se realiza lo mismo para cada muestra.

#### Análisis de fibras de celulosa con azul de metileno en el microscopio

- 1) Se conecta y enciende el equipo.
- 2) Se enfoca el lente a utilizar .
- 3) Se pone la muestra en una placa y se agrega una gota de agua destilada.
- 4) La placa se pone debajo del lente.
- 5) Enfocar el lente y observar.

### Análisis de espectroscopia infrarroja FTIR

- 1) Limpiar la celda cuidadosamente para evitar que existan contaminaciones
- 2) Colocar la muestra en la celda
- 3) Colocar la celda en el espectrofotómetro infrarrojo
- 4) Realizar la medida en el espectro en función de la longitud de onda
- 5) Registrar los valores de longitud de onda y absorbancia

## VII. RESULTADOS

*Tabla 1: Propiedades de combustión para biomasa de fibra de palma*

	Contenido de humedad promedio (m/m)	Contenido de cenizas (m/m)	Poder calorífico (MJ/kg)	Tamaño de partícula (mm)
<b>Resultados</b>	10.55% ±0.14	3.34%±0.06	16.32±0.41	0.26- 0.36

- Estos resultados fueron obtenidos por medio de la balanza de humedad, mufla y bomba calorimétrica en el laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala.

*Tabla 2: Comparación del poder calorífico de la fibra de palma con biocombustibles sólidos*

	Fibra de palma	Bagazo	Madera	Antracita	Coque	Carbón huella
<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>	16.32	17.35	15.00	31.40	28.40	29.30

(Ingemecánica, s.f).

*Tabla 3: Comparación del poder calorífico de la fibra de palma con biocombustibles líquidos*

	Fibra de palma	Gasolina	Diésel	Queroseno	Fuel Oil	Etanol
<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>	16.32	44.00	42.50	43.00	40.00	29.70

(Ingemecánica, s.f).

*Tabla 4: Propiedades del agregado de cemento fibra de palma*

	Tamaño nominal máximo	Modelo de finura
<b>Fibra de palma</b>	0.26 mm	3.38

- Estos resultados fueron obtenidos por medio de la tamizadora y el análisis granulométrico, siguiendo el procedimiento detallado en metodología y en el marco teórico.

**Tabla 5:** Pruebas de compresión a la resistencia de la mezcla de cemento celular con una densidad de 956 kg/m<sup>3</sup> con agregado fino de fibra de palma africana

Tiempo de curado	Resistencia (psi)	Rango aceptado por la ACI 523.3R-14 (luego de 28 días)
24 horas secado al aire	367±11	Aceptado
7 días de curado	178±3.06	Aceptado
28 días de curado	268±36.01	Aceptado

- Estos resultados fueron obtenidos por medio de la máquina de ensayo a la compresión Versa test en el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad del Valle de Guatemala. El resultado es comparado por la norma ACI 523.R-14

**Tabla 6:** Comparación del cemento celular de fibra de palma y arena pómez

Tipo de agregado	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (psi)
Fibra de palma africana	956	367±11
Arena piedra pómez	1390	516.67

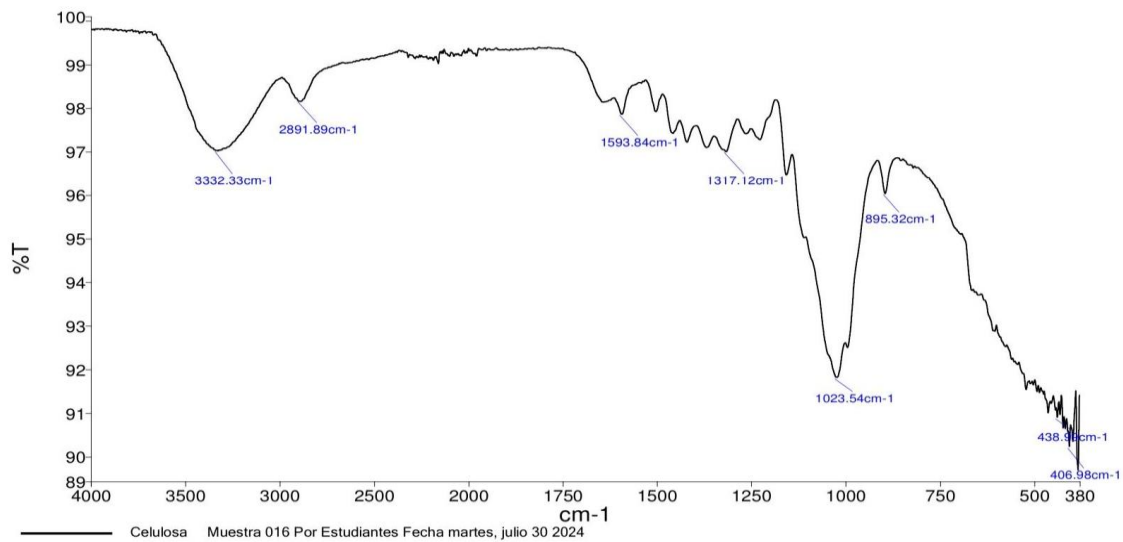
(Yok, 2018).

**Tabla 7:** Rendimiento de la celulosa en la fibra de palma africana

Método a la sosa	Biomasa inicial	Biomasa final	Rendimiento de la fibra celulosa (m/m)
Fibra de palma africana	40 g	26.33 g±0.57	65 %
Paja de caña	40 g	15.90 g	40%

- Estos resultados fueron obtenidos por medio de la ecuación de rendimiento para el proceso del método a la sosa en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. El resultado es comparado con los resultados del estudio de García.

Figura 42: Espectroscopia infrarrojo de la pureza de la fibra celulosa de la palma africana



- Esta imagen fue generada en el laboratorio de análisis instrumental en la Universidad del Valle de Guatemala

Tabla 8: Resultados de la espectroscopia infrarrojo de la fibra de celulosa

Pico paja de caña (cm-1)	Pico fibra de palma africana (cm-1)	Enlace	Significado
3480	3323.33	O-H	Vibraciones de estiramiento en la celulosa
2890	2891.89	H-C-H	Enlaces de la celulosa
1670	1593.84	O-H	Agua absorbida por la fibra
1380	1317.12	C-H	Vibraciones de flexión de la celulosa
1060	1023.54	C-O-C	Flexión de enlace
895	895.32	C-H	Vibraciones de formación

- Estos resultados fueron obtenidos por medio de la ecuación de rendimiento para el proceso del método a la sosa en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. El resultado es comparado con los resultados del estudio de García, como se encuentra en la Figura 41 de antecedentes.

**Tabla 9:** Prueba de absorbancia de azul de metileno por fibras de celulosa

Absorbancia inicial (nm)	Absorbancia final
645	134

- Estos resultados fueron obtenidos por medio la absorbancia por medio de un espectrofotómetro a 6000 nm, a una concentración del 1% de azul de metileno es en el

*Figura 43: Estructura de la celulosa con tinte de azul de metileno*



- Experimentación realizada en el laboratorio del CIT 113 en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 44: Prueba de absorbancia de azul de metileno por las fibras de celulosa*



- Experimentación realizada en el laboratorio del CIT 113 en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 45: Comparación de color azul de metileno en fibras de celulosa*



- Experimentación realizada en el laboratorio del CIT 113 en la Universidad del Valle de Guatemala

*Tabla 10: Operaciones unitarias de cada aplicación propuesta*

<b>Operación Unitaria</b>	<b>Poder calorífico</b>	<b>Cemento celular</b>	<b>Fibra de celulosa</b>
Molienda	X	X	X
Tamizaje	X	X	X
Combustión	X		
Mezcla		X	
Fraguado		X	
Secado		X	
Alcalinización			X
Filtrado			X

## VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta experimentación se realizó con el fin de evaluar las posibles aplicaciones de la fibra de palma africana a nivel de laboratorio. Se propusieron tres aplicaciones para esta fibra, ya que no existen otras aplicaciones concretas sobre su uso. Es importante evaluarlas debido a que la fibra de palma africana es un residuo orgánico que se genera en grandes cantidades. Según Grepalma, en 2023 en Guatemala se plantaron 180,614 hectáreas de palma africana, lo que representa el 1.66% del territorio del país. Por lo que es crucial encontrar un uso para la biomasa que se desecha después del procesamiento.

Para poder realizar las experimentaciones para cada aplicación, la fibra de palma tuvo que ser triturada y tamizada. Cabe mencionar que debe de estar guardada a temperatura ambiente ya que si está en temperaturas menores puede contaminarse o aumentar su humedad. Es importante tomar en cuenta que la media de humedad de la fibra fue del 10.55%. Por el tipo de biomasa que es se utilizó un molino de cuchillas para poder triturar la muestra para poder utilizarse en las distintas pruebas, los picos que tiene la fibra fueron recortados manualmente y solo se trituró la fibra. Este tipo de molino se recomienda ya que se obtuvo una eficiencia del 94% como se observa en la Tabla 27. Para la prueba en la bomba calorimétrica, el crisol del equipo puede contener la fibra de menor tamaño, la cual fue de entre 0.18-0.15 mm. En promedio para cada prueba se utilizó 0.1092 g de biomasa.

El primer objetivo fue determinar si los valores obtenidos experimentalmente del poder calorífico de la fibra de palma africana están dentro del rango necesario para una combustión efectiva. Esta aplicación es importante porque actualmente se buscan alternativas sostenibles para generar energía eléctrica. Al quemar biomasa, se emiten más gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, debido a que la biomasa es una fuente sólida. Sin embargo, el dióxido de carbono liberado durante la combustión es compensado por el absorbido por las plantaciones durante su crecimiento, lo que contribuye a un ciclo de carbono casi neutro. Es un ciclo de carbono casi neutro porque al transportar la biomasa, se utilizan combustibles fósiles que contribuyen a que no sea completo. Como la biomasa utilizada en estas calderas proviene de residuos agrícolas y forestales, esto no solo reduce la cantidad de desechos, sino que también transforma subproductos en una valiosa fuente de energía. La cogeneración a partir de biomasa mejora la eficiencia energética y reduce los costos operativos al utilizar un recurso que de otro modo sería un residuo. Además, sustituye el uso de combustibles fósiles, los cuales generan contaminación ambiental.

Antes de determinar el poder calorífico de la muestra, se realizaron dos pruebas importantes que afectan la combustión. En primer lugar, se obtuvo experimentalmente el porcentaje de cenizas, que fue del 3.34%. Estos resultados respaldan el objetivo, ya que para que la biomasa sea utilizable, el contenido de cenizas en las calderas debe ser bajo. Un alto contenido de cenizas disminuye el contenido calorífico del combustible, reduciendo la temperatura de combustión. Esto ocurre cuando la ceniza absorbe calor e interfiere en el contacto entre el combustible y el oxígeno. Como resultado, se disminuye el rendimiento térmico de la caldera. En el caso de la fibra de palma, el porcentaje es menor al 5%, lo que indica que no genera suficientes cenizas para interferir, y por esta propiedad puede ser una buena fuente para generar electricidad y vapor (Paucar, 2021).

El segundo aspecto por considerar es la humedad inicial de cada muestra, ya que afecta la combustión. La fibra utilizada tenía un 10.55% de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia en la combustión, porque el calor liberado se utiliza para evaporar el agua contenida en la biomasa, en

lugar de reducir químicamente el material. Según Paucar, el valor obtenido está dentro del rango adecuado para una buena combustión de biomasa en calderas, cuyo valor debe ser menor al 40%.

El valor promedio experimental del poder calorífico fue de 16.32 MJ/kg., el cual fue obtenido por medio de la bomba calorimétrica Ika modelo C200. El cual es un equipo que está diseñado conforme a varias normativas internacionales, como DIN 51900, ASTM D5865, y ISO 1928, lo que garantiza la fiabilidad y precisión en la medición del poder calorífico de las muestras. Comparado con biomasa como la madera dura, incluyendo roble, encina y olivo, que tiene un poder calorífico de 15 MJ/kg. Se confirma que la fibra de palma tiene un mayor potencial energético que la biomasa utilizada actualmente en la mayoría de las calderas. Las calderas que utilizan madera son altamente eficientes debido a la combustión controlada de la madera, generando calor de manera efectiva, lo que se traduce en un alto rendimiento energético y una reducción de costos operativos a largo plazo. Por lo que, al utilizar fibra de palma en lugar de madera, se puede llegar a obtener estos mismos beneficios, debido a que ambas son fuentes celulósicas con propiedades similares las cuales son el poder calorífico, la humedad y el porcentaje de cenizas. También se puede comparar con el poder calorífico del bagazo, que es de 17.335 MJ/kg. La eficiencia energética del bagazo alcanza rendimientos de hasta el 77.3% en comparación con calderas convencionales, lo que indica que la fibra de palma tiene un potencial energético comparable entre estas dos biomásas y puede ser aprovechada energéticamente, porque ambas son fuentes celulósicas de biomasa (Martínez, 2015).

Al compararla con otras fuentes sólidas más comunes de la Tabla 2, se observa que el carbón tiene un poder calorífico de 29.30 MJ/kg. Aunque que el poder calorífico de la fibra de palma es menor a este, esto se debe a que el carbón está compuesto principalmente de carbono, un elemento con alta densidad energética, mientras que la biomasa es una fuente celulósica compuesta mayormente de carbono. Esto es porque la celulosa es un polímero lineal formado por unidades repetidas de glucosa, que es un monosacárido. Cada unidad de glucosa contiene seis átomos de carbono, lo que contribuye significativamente al contenido total de carbono en la celulosa. Sin embargo, el uso de combustibles fósiles tiene un efecto negativo sobre el medio ambiente, al generar gases de efecto invernadero durante su combustión y fabricación. También, al compararlo con combustibles líquidos como el queroseno o el diésel, los cuales se encuentran en un rango de 29 hasta 44 MJ/kg como se observa en la tabla 3, también existe una diferencia en el poder calorífico. Pero, al utilizar combustibles fósiles, no solo existe una mayor contaminación al ambiente, sino que el costo es mayor que el de quemar residuos orgánicos. Por lo tanto, utilizar la fibra de celulosa es una opción viable para generar energía, aunque se necesite más cantidad para generar la misma energía que con un combustible fósil, resulta en menos contaminación y a un menor costo debido a que es casi nulo al utilizar un residuo que no tiene uso.

Como segunda aplicación, se propuso utilizar la fibra como agregado para producir cemento celular. Luego de la trituración, se realizó un tamizaje para poder controlar los límites de porcentaje retenidos por la norma NTG 4106, estos se encuentran en la Tabla 27 de datos calculados. Este es un parámetro importante porque el porcentaje retenido en cada mesh debe de estar dentro de los límites impuestos por la norma para que sea un agregado aceptado. En este caso, el agregado si cumple con la norma.

En Guatemala, existen estudios que utilizan distintos tipos de arena para producir este tipo de cemento, uno de los más comunes es la arena pómez. La arena pómez es un material volcánico ligero que tiene una densidad baja. Cuando se mezcla con cemento y otros materiales, ayuda a reducir el peso del cemento celular, que es una característica deseable para aplicaciones donde el peso reducido es beneficioso, como en la construcción de muros y paneles. Según el estudio de Alexander Yoc, se realizaron pruebas con piedra pómez, donde se obtuvo como resultado un cemento celular exitoso, con

un agregado fino con un módulo de finura de 3.34. Al comparar este módulo con el resultante de esta experimentación, el cual fue de 3.38, se puede observar que están en un mismo rango de agregado, este es el tipo de arena gruesa según la Figura 24, por lo que los agregados son comparables.

En ambos estudios se rigieron por la norma COGUANOR NTG 41063 porque establece las especificaciones para los agregados livianos destinados a ser utilizados en la fabricación de unidades de mampostería de concreto cuando el objetivo principal es reducir la densidad del material. Esta norma es la aceptada por Guatemala, pero proviene de la norma ASTM C33 que es la cual rige los requisitos de los agregados a nivel mundial. También apoyándose de la norma ACI 523.3R-14, titulada "Guide for Cellular Concretes Above 50 lb/ft<sup>3</sup> (800 kg/m<sup>3</sup>)", es un documento publicado por el American Concrete Institute (ACI) que proporciona directrices sobre el uso y las propiedades de los concretos celulares que tienen una densidad superior a 50 lb/ft<sup>3</sup> (800 kg/m<sup>3</sup>). Al seguir la metodología regida por la COGUANOR NTG 41063 se puede observar que el agregado de fibra de celulosa cumple con los valores impuestos para la granulometría de los agregados y es parecida a la de la piedra pómez, el cual se puede observar en la Tabla 22. Además, al comparar la Figura 37 con la Figura 43 se observa que existe un comportamiento similar, con un pico que demuestra una retención mayor de agregado entre el Mesh 30 para la piedra pómez y el Mesh 45 para la fibra. Esto rige el tamaño promedio de la muestra entre 0.564 mm y 0.847 mm. Comparando los valores retenidos con los límites de la norma para ambos casos demuestra que son agregados similares que cumplen con la norma COGUANOR NTG 41063.

Se realizaron distintos ensayos, uno donde se secó al aire y otro donde se fraguó por 28 días como se observa en la Tabla 4. Según la ACI 523.3 dependiendo de la densidad del concreto, esta debe cumplir con un valor de resistencia. Tanto para el secado de 24 horas como los 28 días de fraguado están en el rango aceptado por la norma ya que se formuló un cemento con una densidad entre 800 y 1040 kg/m<sup>3</sup> por lo que debería de resultar en una compresión típica entre 250 a 550 psia. El concreto formulado con una densidad promedio de 956 kg/m<sup>3</sup> obtuvo una resistencia a los 28 días de fraguado de 268 ±36.01 psia. Cabe agregar que también se realizó una prueba a los 7 días de fraguado, debido a que este debe de cumplir con el 60% de su resistencia. Como se observa en la Tabla 5, la resistencia fue de 178 ±3.06 psia. Por otro lado, el mortero que se secó al aire por 24 horas tuvo una resistencia de 367 ±11 psia. Este resultado fue el mayor, por lo que indica que esta es la metodología para obtener un concreto de densidad promedio de 956 kg/m<sup>3</sup> pero con una mayor resistencia. Esto se debe a que, al fraguar el concreto celular en agua, las fibras absorben parte de esta causando que la fibra cambie su composición y como estas se integran con la matriz del cemento. Por lo que es importante controlar que no exista un exceso de agua para que no afecte la resistencia. Este cemento fue formulado con una relación 1 a 1 en volumen, el cual es dictado por la norma COGUANOR NTG 41063. de cemento con agregado para generar un cemento con una densidad entre 400 a 14000 kg/m<sup>3</sup> debido a que se buscaba un cemento de baja o media densidad por ser un agregado celular. Tanto la arena pómez como la fibra de palma en la mezcla tienen influencia directa en esta característica, por ser un material absorbente y retenedor de agua producen un curado prolongado en los materiales constituyentes.

El estudio de Alexander Yoc, con la formulación con una relación de agregado/cemento de 2.4 produjo un cemento con una densidad de mayor, de 1390 kg/m<sup>3</sup> por lo cual generó una resistencia mayor de 516.67 psia. Al compararlo con el cemento celular, se puede observar que el aumento del esfuerzo a compresión es directamente proporcional al aumento de densidad. Por lo que la formulación del cemento y la densidad que se busque va a dictar la resistencia y por lo tanto su aplicación. El tipo de cemento producido se encuentra en un rango de densidad mediana. Por lo que, las aplicaciones de este

tipo de cemento pueden ser varias, se utiliza entre techos y entresijos como aislante térmico o acústico. También puede utilizarse en prefabricados no portantes y bloques.

Como tercer punto se siguió una metodología para obtener fibras de celulosa. Para obtener pasta de celulosa el principio se basa en la separación de las fibras de la biomasa. Existen dos procesos principales, el método del sulfito o el kraft. En este estudio se realizó una variación del método kraft al utilizar soda cáustica, con el fin de utilizar reactivos de grado industrial sin la utilización de sulfuro. Este método es llamado método a la sosa o el método alcalino y fue seleccionado porque como la biomasa es un desecho, se deseaba utilizar recursos accesibles y económicos para generar las fibras de celulosa. La solución de hidróxido de sodio debe estar al 10% en 1000 ml de agua, para agregar 40 g de biomasa, a una temperatura de 90 C.

Luego de realizar el método, se obtuvo una pasta fina. Para cuantificar la cantidad de pulpa de celulosa extraída de las muestras de la palma, se utilizó la ecuación de rendimiento de fibra de celulosa. La cual se refiere al porcentaje de fibra recuperada después de la extracción con la soda cáustica, como se observa en la Tabla 6. Según Garcia Estrada, el rendimiento para este método con paja de caña como biomasa es del 40%. mientras que para la fibra de palma africana es de 65%. Esto refleja que la fibra de palma africana si puede ser una potencial fuente para extraer la celulosa por este método ya que el rendimiento es mayor que el de la paja.

Esto es debido a que la fibra de palma africana tiene un contenido de celulosa relativamente alto y generalmente tiene una estructura más uniforme y densa en comparación con la paja de caña. Esta estructura puede facilitar un mejor rendimiento en procesos ya que una fibra más uniforme permite una mejor manipulación y procesamiento. Además, las fibras de palma pueden ser más largas y tener un diámetro más adecuado para ciertos procesos industriales en comparación con la paja de caña. Las fibras más largas tienen mejores propiedades mecánicas y pueden ofrecer un rendimiento superior en aplicaciones industriales.

Para confirmar que la fibra extraída fuera celulosa, primero se realizó un análisis mediante el espectro IR. En la Figura 42 se muestra los enlaces que tiene la muestra luego del método a la sosa. Se puede observar que no existe pico en  $1730\text{ cm}^{-1}$ , este pico corresponde al grupo C=O presente en la hemicelulosa y la lignina. Además, tampoco se encuentra el pico de  $1610\text{ cm}^{-1}$ , el cual es asignado al enlace C=C de las vibraciones de estiramiento de los anillos aromáticos de la lignina (Moran et al., 2008; Coates, 2000). Ninguno de estos picos está presente porque se eliminaron con el tratamiento, obteniendo una fibra de celulosa más pura. El hidróxido de sodio es una base fuerte y tiene varias formas de interactuar con la lignina y la hemicelulosa. Primero la lignina contiene enlaces éster, el hidróxido de sodio se encarga de la descomposición del enlace  $\beta$ -O-4, que es uno de los enlaces más comunes en su estructura. La reacción resulta en la liberación de los grupos fenólicos libres y la formación de compuestos más solubles en agua. Además, estos enlaces ésteres que pueden ser hidrolizados por el NaOH en un proceso llamado saponificación en donde los grupos éster en la lignina se convierten en alcohol y sales carboxílicas. Durante el proceso de descomposición, algunos ácidos fenólicos liberados se neutralizan con NaOH, esto resulta en la formación de sales sódicas de los ácidos fenólicos, que son solubles en agua y fueron eliminadas fácilmente del sistema cuando se lavó con agua en pH 7. Con respecto a la hemicelulosa, la base rompe los enlaces glicosídicos. Estos son enlaces covalentes que se forman entre dos monosacáridos, liberando estos y otros productos solubles (March, 1992).

Al comparar los picos obtenidos para la fibra de palma con los de la paja de caña en la Tabla 8, se puede observar que estos están en los mismos rangos. Se observa una banda a  $3323.33\text{ cm}^{-1}$  la cual se da por las vibraciones de estiramiento características de los enlaces O-H presentes en la celulosa. Por otro lado, la intensidad del pico  $2891.89\text{ cm}^{-1}$  es por los enlaces H-C-H presentes en la celulosa. Luego, el pico  $1593.84\text{ cm}^{-1}$  muestra los enlaces O-H del agua absorbida durante el método de la fibra en la celulosa. (Garcia, s.f).

Los picos que se forman en  $1317.12\text{ cm}^{-1}$  y en el  $1023.54\text{ cm}^{-1}$  surgen por las vibraciones de flexión de la celulosa. En el primer pico se dan por enlace C-H y en el siguiente se produce por los enlaces C-O-C presentes en la celulosa. Estas vibraciones son movimientos en los cuales los átomos en una molécula cambian el ángulo entre los enlaces, sin alterar significativamente la longitud de los enlaces. En este caso implican el movimiento relativo de los átomos de hidrógeno y oxígeno con respecto al carbono, dentro del enlace C-H y C-O-C en la celulosa. Típicamente muestran absorciones en el rango de 1000-1200 que son características de las vibraciones de flexión en los enlaces glicosídicos. Finalmente, el pico  $895.32\text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones de deformación de C-H, presentes en la celulosa. Estos se refieren a movimientos específicos dentro de las moléculas donde los átomos de hidrógeno y carbono cambian sus posiciones relativas, afectando el ángulo entre los enlaces C-H sin alterar significativamente la longitud de los enlaces. Por lo que este análisis permite concluir que la celulosa extraída de la fibra de palma si es celulosa y de similar pureza a la que fue extraída de la paja de caña (Silverstein, Webster & Kiemle, 2014).

Otra manera en la que se probó que la fibra extraída si era de celulosa, fue por medio de la utilización de un microscopio y una solución de azul de metileno. Como se puede observar en la Figura 60, la estructura de la fibra está totalmente de color azul, esto es debido a que la fibra adsorbió el azul de metileno. El azul de metileno es un colorante catiónico, lo que significa que tiene una carga positiva. La celulosa, al tener grupos hidroxilo en su estructura, puede interactuar con el colorante a través de enlaces electrostáticos. Los grupos hidroxilo pueden formar enlaces de hidrógeno con el azul de metileno, facilitando su absorción en la superficie de la fibra. Además, la celulosa es un material hidrofílico, lo que significa que tiene afinidad por el agua y otros compuestos polares. Esta propiedad también contribuye a su capacidad para absorber colorantes como el azul de metileno, que se disuelven en agua. Esto también se puede confirmar con los resultados obtenidos en el cuadro, donde se obtuvo la absorbancia por medio de un espectrofotómetro, donde al inicio la concentración de la solución de 50 ml de agua con azul de metileno al 1% , obtuvo una lectura de 654 y luego de 1 hora se obtuvo una lectura de 134. Por lo que la fibra adsorbió la mayor cantidad del colorante, dejando una solución casi transparente y las fibras completamente azules debido a lo mencionado anteriormente (Lara, 2021).

Como podemos concluir, la fibra de palma africana demuestra ser una opción viable tanto para aplicaciones energéticas como en la producción de materiales de construcción y celulosa. Su uso podría contribuir a prácticas más sostenibles en la generación de energía y construcción, además de aprovechar residuos agrícolas. La decisión de cuál es la propuesta a utilizar dependerá del costo beneficio de cada una.

Algunas de las ventajas al utilizar la fibra de palma como biocombustible solido es la reducción de residuos ya que ayuda a reducir la cantidad de desechos, contribuyendo a una gestión más sostenible. Por otro lado, las desventajas son las emisiones contaminantes que se pueden liberar contaminantes al aire, incluyendo partículas y gases nocivos, si no se controla adecuadamente. Otra desventaja es que la

eficiencia del proceso puede depender del contenido de humedad y la composición específica del material fibroso, lo que puede afectar la cantidad de energía producida por lo que debe de ser regulada a los parámetros mencionados anteriormente (García et al., 2010).

Luego, para la segunda aplicación la fibra de palma africana puede mejorar las propiedades mecánicas del cemento, como la resistencia a la compresión y la flexibilidad, al ser utilizada como un aditivo en la mezcla de cemento. Al utilizar fibras de palma africana también se contribuye a la sostenibilidad al aprovechar residuos agroindustriales que de otro modo serían desechados, reduciendo el impacto ambiental. Al contrario, algunas consecuencias son la calidad y las propiedades mecánicas de la fibra pueden variar dependiendo del proceso de recolección y tratamiento, lo que puede afectar la consistencia del material final y existen limitaciones en aplicaciones estructurales (Angarita et al., 2009).

Por último, en la obtención de las fibras obtenidas de la palma africana se tienen algunas ventajas para el medio ambiente. La primera es que son biodegradables, lo que las hace una opción ecológica para diversas aplicaciones industriales. Las fibras pueden ser utilizadas en una variedad de productos, desde papel hasta biocompuestos y textiles, lo cual ayuda al medio ambiente al sustituir polímeros u otro material (Zchimmer & Zchwars, 2020). Pero como desventaja se tiene un costo elevado por los reactivos utilizados y requiere tratamientos químicos que pueden tener un impacto ambiental si no se gestionan adecuadamente, como la solución de agua e hidróxido de sodio. Estos desechos deben ser regulados para que no haya contaminantes (Zchimmer & Zchwars, 2020).

Por lo que la aplicación de la fibra de palma africana presenta diversas ventajas y desventajas en diferentes áreas. Su uso en cemento celular y generación eléctrica contribuye a prácticas sostenibles; sin embargo, es fundamental abordar los desafíos relacionados con su procesamiento y calidad para maximizar sus beneficios.

## IX. CONCLUSIONES

La fibra de palma africana tiene un poder calórico promedio de 16.32 MJ/kg, que es superior al de la madera el cual es 15 MJ/kg y comparable al del bagazo de 17.335 MJ/kg. Esto sugiere que la fibra de palma puede ser una fuente de combustión de alto poder calorífico para su uso en calderas para generación de electricidad y vapor. El bajo contenido de cenizas de tan solo 3.34% y el nivel de humedad del 10.55% son favorables para una combustión eficiente. Esto indica que la fibra de palma no afectará negativamente el rendimiento de las calderas, al contrario, su bajo contenido de cenizas ayuda a mantener una combustión efectiva.

La fibra de palma africana se muestra adecuada como agregado para cemento celular, con características de granulometría similares a la piedra pómez y un módulo de finura de 3.4. El cemento celular producido cumple con las normas ACI 523.33 y la COGUANOR 41063 para aplicaciones en construcción. El concreto formulado con fibra de palma con una densidad promedio de  $956 \text{ kg/m}^3$  obtuvo una resistencia de  $268 \pm 36.01$  psia. Mientras que el cemento con piedra pómez con densidad de  $1390 \text{ kg/m}^3$  generó una resistencia mayor de 516.67 psia. Aunque el cemento celular formulado con fibra de palma tiene una densidad menor y resistencia ligeramente inferior en comparación con el cemento hecho con piedra pómez, sugiere que la fibra de palma si puede ser una alternativa viable pero con algunas diferencias en aplicación.

El método a la sosa utilizado para extraer la celulosa de la fibra de palma africana muestra un rendimiento del 65%, superior al de la paja de caña, el cual fue del 40%. Esto sugiere que la fibra de palma es una fuente eficaz para la producción de fibras de celulosa. El análisis espectroscópico (IR) confirma la presencia de celulosa en la fibra extraída y muestra características similares a la de la paja de caña, con picos en los rangos esperados para celulosa. Además, la absorción de azul de metileno confirma la naturaleza celulósica de la fibra.

## X. RECOMENDACIONES

Como primer punto, se recomienda evaluar otras posibles aplicaciones fuera de los propuestos como en la producción de azúcares fermentables. Esto podría ser posible porque la fibra prensada de palma puede ser tratada biológicamente para la obtención de estos azúcares, que son útiles en la producción de biocombustibles y otros productos químicos.

También, se recomienda la evaluación de la biomasa de fibra de palma como biofertilizante, contribuyendo a la mejora del suelo y la sostenibilidad.

Además, se podría evaluar la viabilidad del escalamiento de la utilización de la fibra del raquis de palma a nivel industrial, por medio de una caldera de biomasa.

Por otro lado, se podría investigar con qué otros agregados se puede mezclar la fibra para obtener distintos tipos de cemento celular. Esto podría proporcionar información de una mezcla de cemento con más resistencia a la compresión.

Adicionalmente, se podría seguir la línea de investigación sobre la recuperación de la celulosa cristalina por medio de métodos de hidrólisis ácida. Ya que, por medio de este método, aunque utiliza condiciones extremas y solventes peligrosos, se logra obtener una celulosa pura.

Por último, se recomienda realizar un análisis de costos para determinar el valor de cada aplicación y concluir si es rentable para poder realizar un análisis costo beneficio de cada una.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Administración del Estado. (2024, 14 de agosto). *Promoción de la energía procedente de fuentes renovables. La Administración al Día*. <https://laadministracionaldia.inap.es/noticia.asp?id=1238329>
2. Asier, A. (13 de agosto del 2024) *¿Cuánto bosque perdimos por la palma?* <https://notificacion.com/cuanto-bosque-perdimos-por-la-palma/>
3. Alonzo, C. (2024). *Estudio expone degradación ambiental y conflictos laborales alrededor de cultivos de palma aceitera en Guatemala y Honduras*. <https://www.plazapublica.com.gt/ambiente/reportaje/estudio-expone-degradacion-ambiental-y-conflictos-laborales-alrededor-de-cultivos>
4. Alvarez, R., & Magar, M. (2011). *El cultivo de palma de aceite y su impacto ambiental en América Latina. Revista de la Facultad de Agronomía*, 30(2), 95-110. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1851-30182011000200005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1851-30182011000200005&script=sci_arttext)
5. Amaya, G. (2010). *Efectos sociales del cultivo de palma de aceite: Condiciones laborales, seguridad social y educación en los trabajadores palmeros de Cumaral*. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/696/tesis312%20%281%29.pdf?isAllowed=y&sequence=4>
6. Área Cooling. (s.f). *Calor latente. Área Cooling*. <https://areacooling.com/es/glosario-de-terminos-hvac/calor-latente/>
7. ASTM International. (s.f.). *About ASTM*. <https://la.astm.org/es/about/>
8. Barriaga, C. (2023). *Aplicación y estudio de las propiedades de las celulosas recicladas obtenidas del papel periódico como una adición para el concreto*. [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/621704/Barriga\\_CE.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20celulosa%20es%20una%20adici%C3%B3n, en%20la%20fabricaci%C3%B3n%20del%20concreto.](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/621704/Barriga_CE.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20celulosa%20es%20una%20adici%C3%B3n, en%20la%20fabricaci%C3%B3n%20del%20concreto.)
9. BBVA. (19 octubre 2022). *Calderas de biomasa: Una segunda vida sostenible para los residuos vegetales. BBVA*. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/calderas-de-biomasa-una-segunda-vida-sostenible-para-los-residuos-vegetales/>
10. Bernadette A. (2020) *Clasificación de los biopolímeros* [https://www.researchgate.net/figure/Figura-21-Clasificacion-de-los-biopolimeros-fuente-autor\\_fig1\\_343452469](https://www.researchgate.net/figure/Figura-21-Clasificacion-de-los-biopolimeros-fuente-autor_fig1_343452469)
11. Boletín de Anestesiología. (20 agosto 2013). *Azul de metileno*. <https://boletinaneestesiologia.wordpress.com/2013/08/20/azul-de-metileno/>
12. Bolio-López, G. (2011). *Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: Obtención y caracterización*. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000200013](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200013)
13. CADTM. (n.d.). *La palma de aceite en América Latina: monocultivo y violencia. CADTM*. <https://www.cadtm.org/La-palma-de-aceite-en-America-Latina-monocultivo-y-violencia>
14. Castellar, G. (2013). *Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado*. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262013000100030&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262013000100030&script=sci_arttext)
15. Convención sobre la Diversidad Biológica. (s.f.). *Riesgos de la palma de aceite en Áreas Protegidas y la biodiversidad*. <https://chm.cbd.int/api/v2013/documents/7023F81E-EFBD-F578-8B84-4E4045E2E8A3/attachments/209815/Riesgos%20palma%20de%20aceite%20APs%20y%20biodiversidad.pdf>

16. Chavez-Simonte, C. (2013). *Liguina, estructura y aplicaciones: Método de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial*. <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323629266003.pdf>
17. CONRED. (s.f.). *Norma COGUANOR NTG 41063: ASTM C331*. [https://conred.gob.gt/normas/NRD3/3\\_agregados/norma\\_coguanor\\_ntg\\_41063\\_astm\\_c331.pdf](https://conred.gob.gt/normas/NRD3/3_agregados/norma_coguanor_ntg_41063_astm_c331.pdf)
18. College Sidekick. (s.f.). *Study documents*. <https://www.collegesidekick.com/study-docs/1618657>
19. Dical. (s.f.). *Pasta de papel: Diferencias entre la química y la mecánica*. <https://dical.es/blog/que-es/pasta-de-papel-diferencias-entre-la-quimica-y-la-mecanica>
20. Del Real, J. (26 abril 2018). *Poder calorífico*. <https://www.consumoteca.com/suministros/poder-calorifico/>
21. Ecovismexico. (s.f.). *Calderas de biomasa en la industria forestal: Un enfoque sostenible para el procesamiento de madera*. Ecovismexico. <https://www.ecovismexico.com/blog/calderas-de-biomasa-en-la-industria-forestal-un-enfoque-sostenible-para-el-procesamiento-de-madera>
22. Edibon. (s.f.). *Bomba calorimétrica*. <https://www.edibon.com/es/bomba-calorimetrica>
23. El Observador. (s.f.). *La palma africana en Guatemala: Expansión y grupos de capital*. <https://ceur.usac.edu.gt/eventos/Ciudades/Presentaciones/05-La-palma-africana-en-Guatemala.pdf>
24. Escamilla, C. (2005). *Obtención de celulosa a partir de los desechos agrícolas del banano*. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642005000100012](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642005000100012)
25. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (s.f.). *Biomass energy*. FAO. <https://www.fao.org/4/t2363s/t2363s0j.htm>
26. Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura. (s.f.). *Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*. <https://fidas.org/normativas/directiva-ue-2018-2001-del-parlamento-europeo-y-del-consejo-de-11-de-diciembre-de-2018-relativa-la-fomento-de-uso-de-energia-procedente-de-fuentes-renovables/>
27. Forney. (s.f.). *Máquinas de ensayo de materiales: ¿Cuál es la adecuada para usted?* Forney Online. Recuperado de <https://forneyonline.com/es/maquinas-de-ensayo-de-materiales-cual-es-la-adecuada-para-usted/>
28. Garcia-Garcia, L. (2013). *Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar*. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223126409008.pdf>
29. Garcia, E. (s.f.). *Obtención de celulosa a partir del bagazo de caña*. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/articulo/download/65/60/10>
30. Gatani, M. (2015). *Materiales compuestos de cáscaras de maní y cemento. Influencia de diferentes tratamientos químicos sobre las propiedades mecánicas*. [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/186932/CONICET\\_Digital\\_Nro.b123de16-894d-4e47-b9fb-a7bb7e8e308f\\_V.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/186932/CONICET_Digital_Nro.b123de16-894d-4e47-b9fb-a7bb7e8e308f_V.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
31. Grepalma (2018) *Resultados de estudio: Impactos económicos del aceite de palma para el 2017* [https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2018/09/ficha\\_cabi\\_2017.pdf](https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2018/09/ficha_cabi_2017.pdf)
32. Greenheiss. (s.f.). *Aprovechamiento de biomasa forestal*. Greenheiss. <https://www.greenheiss.com/aprovechamiento-biomasa-forestal/>
33. Hanbury, S. (2024). *Industria del aceite de palma desplaza a los pequeños agricultores en Guatemala*. <https://es.mongabay.com/2024/01/aceite-de-palma-desplaza-pequenos-agricultores-guatemala/>
34. Heura Medio Ambiente. (2012). *¿Qué es la biomasa?* Heura Medio Ambiente. <https://heuramedioambiente.wordpress.com/2012/04/23/que-es-la-biomasa/>

35. IICA. (s.f.). Producción de energía a partir de bagazo de caña. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://bio-emprender.iica.int/iica-club/produccion-de-energia-a-partir-de-bagazo-de-cana/>
36. Ingeniería para todos (2020) *Materiales componentes del concreto* <https://www.facebook.com/730077137388482/photos/materiales-componentes-del-concreto-hormig%C3%B3n-el-concreto-es-una-mescla-de-difere/1034623553600504/>
37. Isved. (s.f). *Introducción Heizomat.* <https://www.isved.com/introduccion-heizomat/>
38. Instituto Mexicano del Transporte. (s.f). *Manual de ensayos de laboratorio para agregados para mezclas asfálticas.* <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt551.pdf>
39. Ingemeccánica. (s.f.). Poder calorífico de los combustibles - Cómo se calcula y tablas de valores. <https://ingemecanica.com/utilidades/poder-calorifico.html>
40. JXSC Machine. (s.f). *Equipos de trituración y molienda: Averías comunes y soluciones.* <https://www.jxscmachine.com/es/nuevo/equipos-de-trituracion-molienda-averias-comunes-soluciones/>
41. Jiron, E. (2022). *Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña.* [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822022000200167&script=sci\\_arttext#:~:text=El%20raquis%20de%20palma%2C%20por,molecular%20llamadas%20extractivos%20\(15\).](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822022000200167&script=sci_arttext#:~:text=El%20raquis%20de%20palma%2C%20por,molecular%20llamadas%20extractivos%20(15).)
42. Kalstein. (s.f). *Espectrofotómetro: Tipos y partes.* [https://www.kalstein.com.pa/espectrofotometro-tipos-y-partes/?\\_cf\\_chl\\_tk=4XGkxUIWYT6NyqaO2uz4BunYan\\_kMvD4RGogKCJsA8-1723734381-0.0.1.1-3860](https://www.kalstein.com.pa/espectrofotometro-tipos-y-partes/?_cf_chl_tk=4XGkxUIWYT6NyqaO2uz4BunYan_kMvD4RGogKCJsA8-1723734381-0.0.1.1-3860)
43. Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., & Stroeve, P. (2010). *Chemical composition of biomass. Biomass and Bioenergy*, 34(2), 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.11.010>
44. Lara, P. (2021). *Análisis de la producción de biocombustibles a partir de biomasa de caña de azúcar* <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/44489/1/D-90988.pdf>
45. Labprocess. (s.f.). Tipos de espectrofotómetros. <https://www.labprocess.es/tipos-de-espectrofotometros>
46. León Gamboa, J. (2017). *Desarrollo de una mezcla de concreto seco liviano mediante la metodología de Frasson Jr. utilizando partículas de celulosa reciclada.* [https://repositorio.ulatina.ac.cr/bitstream/20.500.12411/1426/1/TFG\\_Ulatina\\_Jefferson\\_Leon\\_Gamboa\\_20170210293.pdf](https://repositorio.ulatina.ac.cr/bitstream/20.500.12411/1426/1/TFG_Ulatina_Jefferson_Leon_Gamboa_20170210293.pdf)
47. Martínez, S. (2020). *Optimización y caracterización de propiedades mecánicas de un compuesto de raquis de palma y PLA aplicando la metodología Taguchi.* <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/8eca159d-1b7c-4ed3-a4c8-b819c423acc2/content#:~:text=El%20raquis%20o%20usa%20de,se%20utiliza%20como%20abono%20agr%C3%ADcola.>
48. Mettler Toledo. (s.f). *Análisis por tamizado.* [https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Laboratory\\_weighing/sieve-analysis.html#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20por%20tamizado%20es,utilizando%20tamices%20de%20ensayo%20est%C3%A1ndar](https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Laboratory_weighing/sieve-analysis.html#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20por%20tamizado%20es,utilizando%20tamices%20de%20ensayo%20est%C3%A1ndar)
49. Molecular Devices. (s.f). *Absorbance technology.* <https://es.moleculardevices.com/technology/absorbance>
50. Paucar, C. (2021). *Caracterización físico-química del cuesco y fibra obtenidos del procesamiento de palma africana para un aprovechamiento eficiente de la energía térmica en calderas.* <http://portal.amelica.org/ameli/journal/638/6382735009/6382735009.pdf#page11>

51. Pepermprom (10 de octubre de 2022) *Transferencia de calor con cambio de estado de materia de hielo a líquido* <https://www.shutterstock.com/es/image-vector/chemical-molecule-vapor-cold-ice-water-2212736289>
52. Pedraza, Y. (2020). *Caracterización de fibra de cáñamo*. [https://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/ing\\_civil/ing\\_civil/paper/view/3484](https://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/ing_civil/ing_civil/paper/view/3484)
53. Química Orgánica. (s.f). *Estructura del espectrofotómetro*. <https://www.quimicaorganica.org/espectroscopia-visible-ultravioleta/731-estructura-espectrofotometro.html>
54. Resano, D. (2022). *Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción*. [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642022000200247&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642022000200247&script=sci_arttext)
55. Ritchie, J. M., & McKernan, T. (2019). *Azul de metileno: Propiedades y aplicaciones*. En *Manual de colorantes y reactivos*. Editorial Química. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12345-6>
56. Revista Anales del ICAI. (s.f) *Sección 12. Revista Anales del ICAI*. [https://revista-anales.icaei.es/web/n\\_21/seccion\\_12.html](https://revista-anales.icaei.es/web/n_21/seccion_12.html)
57. ResearchGate. (s.f). *Estructura molecular de  $\alpha$ -celulosa y  $\beta$ -hemicelulosa*. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Estructura-molecular-de-a-celulosa-y-b-hemicelulosa-21-22\\_fig6\\_291953365](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Estructura-molecular-de-a-celulosa-y-b-hemicelulosa-21-22_fig6_291953365)
58. Rodríguez, E. (2011). *Obtención y caracterización de la carboximetil celulosa a partir del pseudotallo del plátano*. [https://www.researchgate.net/profile/Ana-Valbuena/publication/318351666\\_OBTENCION\\_Y\\_CARACTERIZACION\\_DE\\_LA\\_CARBOXIMETIL\\_CELULOSA\\_A\\_PARTIR\\_DEL\\_PSEUDOTALLO\\_DE\\_PLATANO\\_MUSA\\_PARADISIACA\\_SP/links/59654900a6fdcc69f148bdce/OBTENCION-Y-CARACTERIZACION-DE-LA-CARBOXIMETIL-CELULOSA-A-PARTIR-DEL-PSEUDOTALLO-DE-PLATANO-MUSA-PARADISIACA-SP.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ana-Valbuena/publication/318351666_OBTENCION_Y_CARACTERIZACION_DE_LA_CARBOXIMETIL_CELULOSA_A_PARTIR_DEL_PSEUDOTALLO_DE_PLATANO_MUSA_PARADISIACA_SP/links/59654900a6fdcc69f148bdce/OBTENCION-Y-CARACTERIZACION-DE-LA-CARBOXIMETIL-CELULOSA-A-PARTIR-DEL-PSEUDOTALLO-DE-PLATANO-MUSA-PARADISIACA-SP.pdf)
59. Sian. (17 de mayo 2022). *Qué es una caldera de biomasa*. *Lasian*. <https://lasian.es/que-es-una-caldera-de-biomasa/>
60. Sika Mexicana (2013) *Identificación de los estados del concreto* [https://www.facebook.com/photo.php?fbid=10153511474945391&id=296377115390&set=a.299030680390&locale=nn\\_NO](https://www.facebook.com/photo.php?fbid=10153511474945391&id=296377115390&set=a.299030680390&locale=nn_NO)
61. Soh, L. (2016a). *The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source*. *Energy Conversion and Management*, 141, 285-298. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.081>
62. Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2013). *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Brooks Cole.
63. Todo Luz y Gas. (s.f). *Poder calorífico*. *Todo Luz y Gas*. <https://www.todoluzygas.es/gas/diccionario/p/poder-calorifico>
64. Test Solution 4U. (s.f). *Compressive strength tester*. <http://testsolution4u.com/1-1-33-compressive-strength-tester/184260/>
65. Universidad de Centroamérica. (s.f). *Granulometría*. <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf>
66. Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f). *Espectroscopia infrarroja*. [https://www.upct.es/~minaees/espectroscopia\\_infrarroja.pdf](https://www.upct.es/~minaees/espectroscopia_infrarroja.pdf)
67. Vaillant. (s.f). *Poder calorífico*. <https://www.vaillant.es/servicios/temas-de-ayuda/glosario/poder-calorifico/>

68. Yoc, A. (2018) *Fabricación y evaluación experimental de unidades de mampostería de concreto celular de espuma perforada*. <https://core.ac.uk/download/pdf/156954744.pdf>
69. Zchimmer & Schwarz. (2020). ¿Qué son los biopolímeros y para qué se utilizan en la industria?

## XII. ANEXOS

### A. Datos originales

*Tabla 11: Datos originales de la caracterización de la fibra de palma*

<b>Prueba</b>	<b>Porcentaje de humedad</b>	<b>Contenido de cenizas</b>	<b>Poder calorífico</b>
Prueba #1	10.66	3.4	16.02
Prueba #2	10.4	3.28	16.15
Prueba #3	10.6	3.35	16.79

*Tabla 12: Datos originales de trituración*

<b>Peso alimentación (g)</b>	<b>Peso a la salida (g)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
210	197.2	203

*Tabla 13: Datos originales del tamizaje*

<b>MESH (ASTM)</b>	<b>Tamaño tamiz (Mm)</b>	<b>Tamaño tamiz (mm)</b>	<b>Plato tamizaje</b>
20	850	0.85	392.3
30	600	0.6	385.3
45	355	0.355	423.9
60	250	0.25	370.2
80	180	0.18	349.4
100	150	0.15	329.8

**Tabla 14:** Datos originales de la biomasa utilizada para la prueba en la bomba calorimétrica

<b>Prueba</b>	<b>Biomasa inicial (g)</b>	<b>Biomasa final (g)</b>
Prueba #1	0.1075	0.03225
Prueba #2	0.1191	0.00357
Prueba #3	0.1010	0.00303

**Tabla 15:** Datos originales de la formulación del cemento celular

<b>Prueba</b>	<b>Cemento Portland (g)</b>	<b>Agregado de fibra (g)</b>
Prueba #1	130	18
Prueba #2	135	19
Prueba #3	130	17
Prueba #4	124	18
Prueba #5	132	17
Prueba #6	127	19

**Tabla 16:** Datos originales de la resistencia del cemento celular de la fibra de palma

<b>Prueba</b>	<b>Resistencia Secado al aire (psi)</b>	<b>Resistencia 7 días (psi)</b>	<b>Resistencia 28 días (psi)</b>
Prueba #1	378	149	300
Prueba #2	356	143	229

**Tabla 17:** Datos originales de la producción de fibra de celulosa de la palma

<b>Prueba</b>	<b>Biomasa inicial</b>	<b>Biomasa final</b>	<b>Rendimiento</b>
Prueba #1	40	25.9	0.6475
Prueba #2	40	26.7	0.6675

**Tabla 18:** Datos originales de la prueba de absorbanza del azul de metileno por la fibra de celulosa

<b>Concentración</b>	<b>Absorbancia (650 nm)</b>	<b>Absorbancia (650 nm)</b>	<b>Absorbancia (650 nm)</b>
Inicial	658	670	643
Final	130	143	128

**Tabla 19:** Datos originales de la utilización de la biomasa total utilizada por aplicación

<b>Aplicación</b>	<b>Biomasa utilizada (g)</b>
Cemento	108
Fibra	80
Calorímetro	0.3276
<b>Total</b>	<b>188.3276</b>

B. Cálculo de muestra

**Ecuación 1:** Cálculo de la masa retenida en cada uno de los platos de tamizaje

$$\text{Masa real} = (\text{Masa plato} + \text{tamiz}) - \text{Masa de plato}$$

$$\text{Masa real} = 392.3 - 381.9 = 10.40$$

- Este cálculo se realiza para todos los platos de la tamizadora, con los datos del cuadro de datos iniciales y los resultados obtenidos se encuentran el cuadro 22 de datos calculados.

**Ecuación 2:** Cálculo del porcentaje de masa retenida en cada uno de los platos

$$\text{Porcentaje de masa retenida} = \frac{\text{Masa retenida en el plato}}{\text{Masa total tamizada}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de masa retenida} = \frac{10.40}{197.2} * 100 = 5.27\%$$

- Este cálculo se realiza para todos los platos de la tamizadora, con los datos del cuadro de datos iniciales y los resultados obtenidos se encuentran el cuadro 22 de datos calculados.

**Ecuación 3:** Cálculo del porcentaje de masa que pasa al siguiente plato

$$\text{Porcentaje de masa que pasa (\%)} = 100 - \text{porcentaje de masa retenida}$$

$$\text{Porcentaje de masa que pasa (\%)} = 100 - 5.27 = 94.73\%$$

- Este cálculo se realiza para todos los platos de la tamizadora, con los datos del cuadro de datos iniciales y los resultados obtenidos se encuentran el cuadro 22 de datos calculados.

**Ecuación 4:** Cálculo del porcentaje retenido acumulado

$$\begin{aligned} & \text{Porcentaje de masa retenida acumulada} \\ & = \left( \frac{\text{Masa retenida en el plato mesh 20}}{\text{Masa total tamizada}} \right) \\ & + \left( \frac{\text{Masa retenida en el plato mesh 30}}{\text{Masa total tamizada}} \right) \\ & + \left( \frac{\text{Masa retenida en el plato mesh 45}}{\text{Masa total tamizada}} \right) + \dots + \left( \frac{\text{Masa retenida en el plato mesh 100}}{\text{Masa total tamizada}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de masa retenida acumulada} & = 5.27 + 13.59 + 60.95 + 81.44 + 87.23 + 90.72 \\ & = 339.20 \end{aligned}$$

- Este cálculo se realiza para todos los platos de la tamizadora, con los datos del cuadro de datos iniciales y los resultados obtenidos se encuentran en el cuadro 22 de datos calculados.

**Ecuación 5:** Cálculo del módulo de fineza

$$\text{Porcentaje de masa retenida acumulada} = \frac{\text{Porcentaje retenido acumulado}}{100}$$

$$\text{Porcentaje de masa retenida acumulada} = \frac{339.20}{100} = 3.39$$

- Este cálculo se realizó para conocer el módulo de finura del agregado utilizado en el cemento celular y se encuentra en el cuadro 3.

**Ecuación 6:** Cálculo del flujo másico del molino

$$\text{Flujo másico del molino} = \frac{\text{Masa entrada}}{\text{tiempo de trituración}}$$

$$\text{Flujo másico del molino} = \frac{210}{203} = 1.0345 \text{ g/s}$$

- Este cálculo se realizó para conocer el flujo másico del molino y se encuentra en el cuadro 23 de datos calculados.

**Ecuación 7:** Cálculo de eficiencia másica de la molienda.

$$\text{Eficiencia de molienda} = \frac{\text{Masa obtenida al final}}{\text{Masa ingresada al molino}}$$

$$\text{Eficiencia de molienda} = \frac{197.2}{210} * 100 = 93.90\%$$

- Este cálculo se realizó para conocer la eficiencia del molino y se encuentra en el cuadro 23 de datos calculados.

**Ecuación 8:** Cálculo de la potencia de trituración del molino

$$\text{Potencia de trituración (W)} = \text{Voltaje} * \text{Corriente}$$

$$\text{Potencia de trituración (W)} = 9.5 * 208 = 1976 \text{ W}$$

- Este cálculo se realizó para conocer la potencia del molino y se encuentra en el cuadro 24 de datos calculados.

**Ecuación 9:** Cálculo de la energía real de trituración del molino

$$\text{Energía real kWh} = \text{Potencia} * \text{tiempo de molienda}$$

$$\text{Energía real kWh} = 1976 * (203/3600)/1000 = 0.1114$$

- Este cálculo se realizó para conocer la energía utilizada del molino y se encuentra en el cuadro 24 de datos calculados.

**Ecuación 10:** Cálculo de eficiencia energética de la molienda

$$\text{Eficiencia energética de la molienda} = \frac{\text{Energía real (kwh)}}{\text{Masa obtenida a la salida del molino (kg)}} * 100$$

$$\text{Eficiencia energética de la molienda} = \frac{0.1114}{197.2} * 100 = 0.0565$$

- Este cálculo se realizó para conocer la eficiencia energética del molino y se encuentra en el cuadro 24 de datos calculados.

### C. Análisis de error

**Ecuación 11:** Cálculo de la media aritmética

$$\text{Media (X)} = \Sigma \frac{An}{n}$$

Donde:

An: Valor de los datos

n: Cantidad de datos

- Este cálculo se realizó para cada uno de los resultados obtenidos en datos originales y el resultado se encuentra en las tablas de datos calculados

**Ecuación 12:** Cálculo de la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(x1 - x2)^2}{n - 1}}$$

Donde:

x1: Media de la muestra

x2: Valor de la muestra

n: Cantidad de datos

- Este cálculo se realizó para cada uno de los resultados obtenidos en datos originales y el resultado se encuentra en las tablas de datos calculados.

D. Datos calculados

**Tabla 20:** Datos estadísticos de la caracterización de la fibra de palma

<b>Prueba</b>	<b>Porcentaje de humedad</b>	<b>Contenido de cenizas</b>	<b>Poder calorífico</b>
Promedio	10.55	3.34	16.32
Desviación	0.1361	0.060	0.4092

**Tabla 21:** Datos estadísticos de la biomasa utilizada para la prueba en la bomba calorimétrica

<b>Prueba</b>	<b>Biomasa (g)</b>
Promedio	0.1092
Desviación	0.0091

**Tabla 22:** Datos estadísticos de la formulación del cemento celular

<b>Prueba</b>	<b>Cemento Portland (g)</b>	<b>Agregado de fibra (g)</b>	<b>Densidad</b>
Promedio	129.67	18.00	956.11
Desviación	3.50	0.82	18.120

**Tabla 23:** Datos estadísticos de los resultados de las pruebas de resistencia del cemento celular

<b>Prueba</b>	<b>Resistencia secado al aire (pisa)</b>	<b>Resistencia 7 días (pisa)</b>	<b>Resistencia 28 días (pisa)</b>
Promedio	367	146	264.5
Desviación	11	3	35.5

**Tabla 24:** Datos estadísticos de la obtención de fibra de celulosa

<b>Prueba</b>	<b>Biomasa inicial</b>	<b>Biomasa final</b>	<b>Rendimiento</b>
Promedio	40	26.3	0.6575
Desviación	0	0.5656	0.014

**Tabla 25:** Análisis granulométrico de la tamizada de fibra de palma

<b>MESH (ASTM)</b>	<b>Tamaño tamiz (mm)</b>	<b>Plato tamizaje (g)</b>	<b>Peso plato (g)</b>	<b>Retenido (g)</b>	<b>Peso pasó (g)</b>	<b>Porcentaje que pasó</b>	<b>Porcentaje retenido</b>	<b>% retenido acumulado</b>
<b>20</b>	0.85	392.3	381.9	10.40	1886.80	94.73	5.27	5.27
<b>30</b>	0.6	385.3	368.9	16.40	170.40	86.41	8.31	13.59
<b>45</b>	0.355	423.9	330.5	93.40	77.00	39.05	47.36	60.95
<b>60</b>	0.25	370.2	329.8	40.40	36.60	18.56	20.49	81.44
<b>80</b>	0.18	349.4	338	11.40	25.20	12.78	5.78	87.22
<b>100</b>	0.15	329.8	322.9	6.90	18.30	9.28	3.50	90.72
<b>Bandeja</b>	0	481.7	463.5	18.30	0.00	0.00	9.28	
		Total	197.2	197.2				

**Tabla 26:** Comparación con la norma COGUANOR NTG 41063

<b>MESH (ASTM)</b>	<b>Porcentaje retenido (%)</b>	<b>Límites de porcentaje según NTG 41063 (%)</b>
<b>20</b>	5.27	0-15
<b>30</b>	8.31	5-20
<b>45</b>	47.36	15-35
<b>60</b>	20.49	5-15
<b>80</b>	5.78	5-15
<b>100</b>	3.50	5-15
<b>Bandeja</b>	9.28	8-20

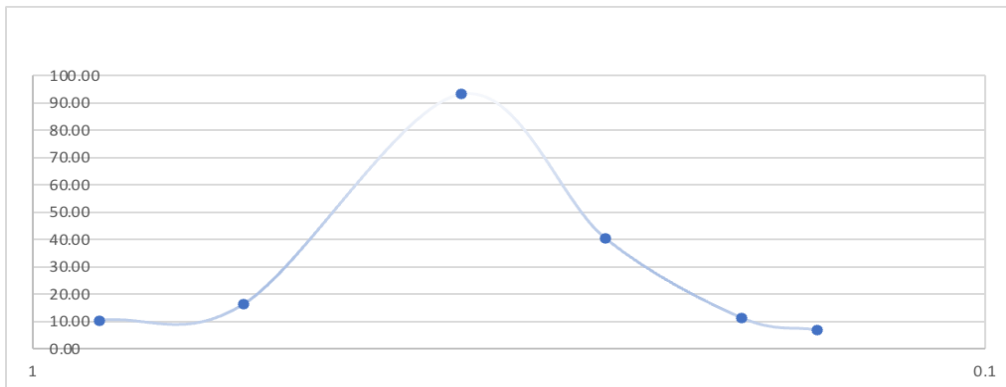
**Tabla 27:** Eficiencia de la molienda de la fibra de palma

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Entrada	210	g
Salida	197.5	g
Flujo de entrada	1.0345	g/s
Flujo de salida	0.9714	g/s
Flujo de salida pérdidas	0.0631	g/s
Eficiencia de trituración	93.90%	g molidos/g alimentados

**Tabla 28:** Eficiencia energética de la molienda

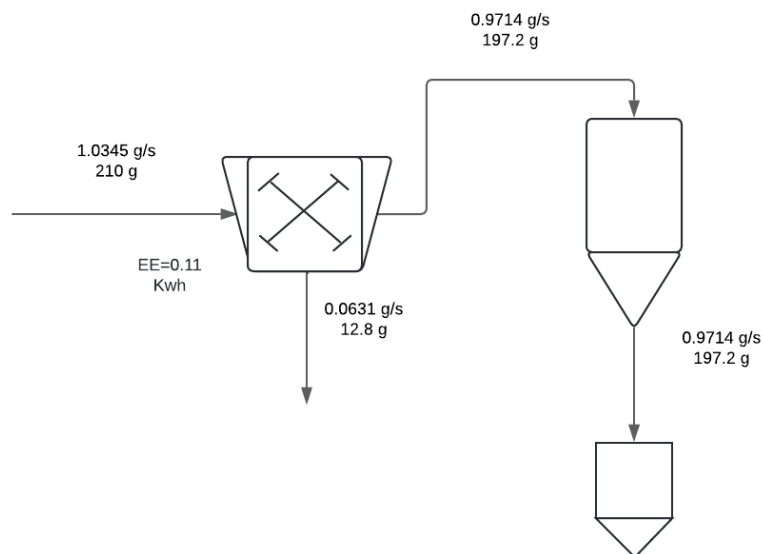
Parámetro	Valor	Unidad
Amperaje	9.5	A
Voltaje	208	V
Eficiencia	0.0565	kwh/kg

**Figura 46:** Gráfica de distribución de tamaño de la fibra de palma



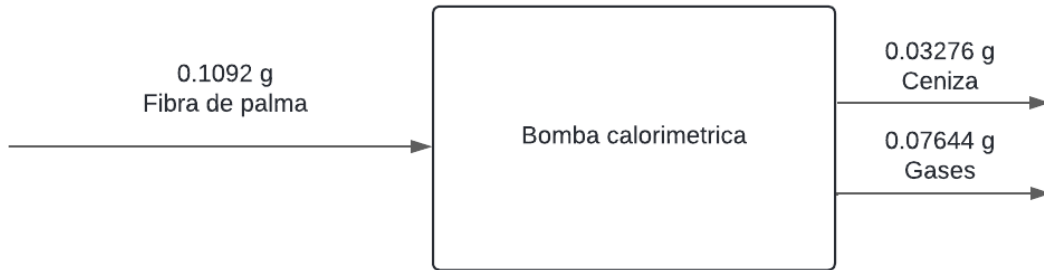
Fuente: elaboración propia

**Figura 47:** Diagrama de flujo de la trituración de la biomasa



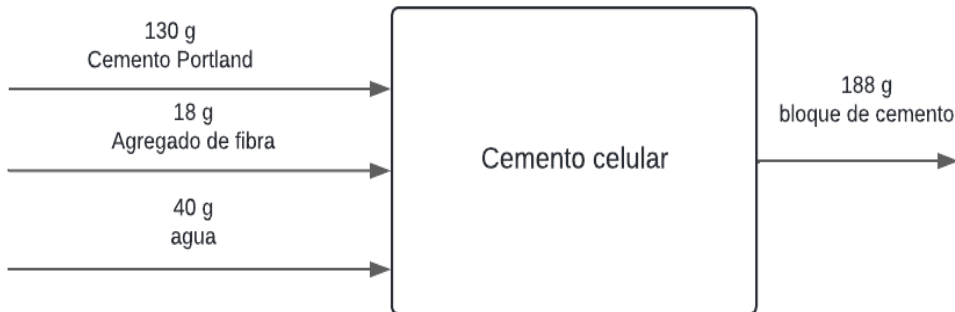
Fuente: elaboración propia

Figura 48: Balance de masa de la prueba en la bomba calorimétrica



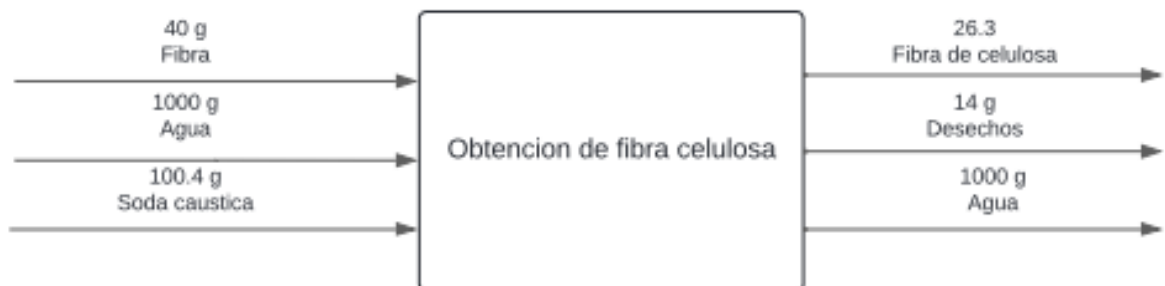
Fuente: elaboración propia

Figura 49: Balance de masa de la producción de los morteros de cemento celular



Fuente: elaboración propia

Figura 50: Balance de masa de la obtención de fibra celular



Fuente: elaboración propia

## E. Evidencias

*Figura 51: Muestra inicial de fibra de palma antes de ser triturada*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad el Valle de Guatemala

*Figura 52: Porcentaje de humedad inicial de la fibra de palma obtenido por medio de la balanza de humedad*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad el Valle de Guatemala

Figura 53: Prueba de la capacidad calorífica por medio de la bomba calorimétrica IKA



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 54: Peso de muestra de la bomba calorimétrica



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 55: Peso de un plato de tamizado*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 56: Producción de cemento celular*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de Ingeniería Civil en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 57: Cemento celular formulado en morteros*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de Ingeniería Civil en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 58: Morteros de cemento celular luego de desmoldar*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de Ingeniería Civil en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 59: Fraguado de cemento celular*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de Ingeniería Civil en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 60: Método a la sosa para obtención de celulosa*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

*Figura 61: Fibras de celulosa luego del método a la sosa*



Nota: Experimentación realizada en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

### XIII. GLOSARIO

1. Absorbancia: Medida de la cantidad de radiación absorbida por una muestra, utilizada para determinar la concentración de solutos mediante espectrofotometría (Molecular Devices, s.f.).
2. Agregado fino: Arena que pasa por el tamiz 3/8" y queda retenido en la malla N° 200, utilizado para llenar espacios en mezclas de concreto (León, 2017).
3. Agregado grueso: Partículas grandes utilizadas en concreto para proporcionar resistencia, retenidas en la malla N°4 (León, 2017).
4. Agregados de celulosa al cemento: Materiales derivados de papel reciclado o fibras de celulosa añadidos al cemento para mejorar propiedades físicas y mecánicas, como la resistencia y el aislamiento (León, 2017).
5. ASTM International: ASTM International, anteriormente conocida como la American Society for Testing and Materials, es una organización que desarrolla y publica normas técnicas consensuadas para materiales, productos, sistemas y servicios.
6. Azul de metileno: Colorante orgánico utilizado en medicina y acuicultura, que se disuelve en agua y alcohol para diversas aplicaciones (Ritchie & McKernan, 2019).
7. Bomba calorimétrica: Dispositivo usado para medir el poder calorífico de combustibles sólidos y líquidos mediante la combustión en un entorno controlado (Servicio de Soporte Técnico y Tecnológico, s.f.).
8. Biomasa: Materia orgánica biodegradable utilizada como fuente energética, incluyendo residuos agrícolas, de silvicultura y de industrias conexas (Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura, s.f.).
9. Biopolímeros: Materiales plásticos obtenidos de fuentes renovables como residuos agrícolas y celulosa. Reducen la dependencia de materiales fósiles y pueden ser biodegradables (Zchimmer & Zchwars, 2020).
10. Celulosa: Polímero natural de alto peso molecular, utilizado en la industria debido a sus propiedades mecánicas, ópticas y de textura, y su capacidad de biodegradación (García-García, 2013).
11. Cemento: Mezcla de cemento, agua, agregados y aditivos, utilizada en construcción por sus propiedades de resistencia, durabilidad e impermeabilidad (Barriaga, 2023).
12. Clasificación por mesh ASTM: Sistema de clasificación de tamaños de partículas basado en el número de aberturas por pulgada de un tamiz (Instituto Mexicano del Transporte, s.f.).
13. Combustión de biomasa en calderas: Proceso de generación de calor y energía mediante la quema de biomasa en calderas, utilizando diversos tipos de residuos orgánicos (Sian, 2022).
14. Concreto: Mezcla de cemento, agua, agregados y aditivos, utilizada en construcción por sus propiedades de resistencia, durabilidad e impermeabilidad (Barriaga, 2023).

15. Gremial de palmicultores de Guatemala (GREPALMA): Asociación en Guatemala que agrupa a productores de palma africana (El observador, s.f.).
16. Granulometría de agregados: Distribución de tamaños de partículas en un agregado, importante para la trabajabilidad y resistencia del concreto (León, 2017).
17. Hemicelulosa: Heteropolímero que forma parte de la pared celular vegetal, con una estructura aleatoria y baja resistencia en comparación con la celulosa (Química.es, s.f.).
18. Lignina: Compuesto que aporta soporte y rigidez a las paredes celulares de las plantas, contribuyendo a la resistencia estructural y evitando la entrada de agua (Chavez-Simonte, 2013).
19. Mampostería: La mampostería es un sistema tradicional de construcción que consiste en erigir muros y paramentos mediante la colocación manual de diversos elementos (s.f.).
20. Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible (RSPO): Organización que certifica las plantaciones de aceite de palma según estándares de sostenibilidad (Hanbury, 2024).
21. Módulo de finura: Índice para determinar las características granulométricas de los agregados; calculado a partir de porcentajes acumulados retenidos en tamices normalizados (UCA, s.f.).
22. Poder calorífico: Medida de la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de un combustible; se clasifica en Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) (Del Real, 2018).
23. Palma Africana: Planta tropical originaria del golfo de Guinea en África; científicamente conocida como *Elaeis guineensis*.
24. Espectrofotómetro: Instrumento que mide la absorbancia de una muestra en diferentes longitudes de onda; permitiendo analizar su composición química (Labprocess, s.f.).
25. Tamizaje: Proceso para determinar la distribución de tamaños de partículas en agregados; crucial para la producción de cemento y concreto de calidad (Mettler Toledo, s.f.).
26. Trituración: Proceso unitario que reduce el tamaño de partículas de un sólido mediante compresión, impacto, cortado y/o fricción; se utilizan trituradoras para productos gruesos y molinos para productos más finos (McCabe, 2016).
27. Vibraciones de flexión: Son movimientos moleculares que ocurren dentro del enlace glicosídico.