

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la**

**Producción**

Extracción de nanocristales de celulosa a partir de bagazo de caña  
y fibras de coco para el refuerzo de geopolímeros basados en zeolita  
natural ecuatoriana

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Andy Bryan Angulo Ruela

Esther Abigail Rendon León

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2023

# DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres, que me han apoyada a lo largo de mi formación académica.

**Andy Angulo Ruela**

A Dios por llenarme de valentía y levantarme en mis peores momentos; a mi padre por su amor incondicional; a mi compañero de vida y alma gemela Ronald Rhor y su mamá Mirna Machuca por su gran apoyo, ustedes son la razón para seguir cada día y ser mejor.

**Esther Rendón León**

# Agradecimientos

A nuestro tutor Dr. Haci Baykara y cotutor Ing. Ariel Riofrío por todo su apoyo, paciencia y confianza que depositaron en nosotros durante todo este proceso. A mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida y la motivación para seguir adelante. A mi novia Linda García quien me alentó y apoyo en este último semestre.

**Andy Angulo Ruela**

A nuestro tutor Ph.D. Haci Baykara y cotutor Ing. Ariel Riofrío por guiarnos en todo el proceso y aportar nuevos conocimientos; A mi padre por mostrarme el camino honesto y perseverante; A Ronald Rhor que me motivó a seguir y creyó en mi cuando ni yo misma lo hacía y al Econ. Rafael Correa, por creer en los jóvenes e impulsar la educación en el Ecuador.

**Esther Rendón León**

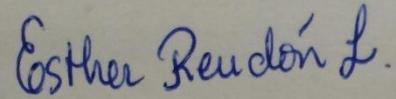
## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Andy Brayan Angulo Ruela* y *Esther Abigail Redon León* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

*Andy Brayan Angulo  
Ruela*



---

*Esther Abigail Redon  
León*

Evaluador

---

**Nadia Flores Manrique**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Haci Baykara**

PROFESOR TUTO

## RESUMEN

Los compuestos de geopolímeros reforzados con nanocelulosa (GPNC) han atraído mucha atención en la industria de construcción debido a excelentes propiedades mecánicas. Los GPNC se han convertido en una alternativa al cemento convencional, promoviendo la conciencia ambiental sobre la liberación de menos CO<sub>2</sub>. El presente trabajo tuvo como finalidad proponer un material ecológico como posible alternativa al cemento convencional, de igual manera, se estudiaron sus propiedades mecánicas reforzados con 0.025, 0.05 y 0.015 % en peso de nanocelulosa (fibras de coco y fibras de bagazo de caña de azúcar). Primeramente, se realizó el tratamiento hidrotérmico sobre ambas especies de fibras, posteriormente, se realizó un tratamiento alcalino con NaOH para aumentar el contenido de celulosa y finalmente se efectuó una hidrólisis ácida asistida con ultrasonido para la obtención de los nanocristales.

Se evaluaron pruebas de compresión a cada muestra de geopolímero. También se utilizaron métodos de caracterización tales como difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis térmico (TGA) y Espectroscopia IR (FTIR). El uso de nanocristales de celulosa al 0.05% en el geopolímero mostro aumento en la resistencia de compresión de 8.2 y 6.5Mpa para los geopolimeros de coco y caña respectivamente. TGA confirmo que la adición de nanocelulosa de caña al 0.15 disminuyo la pérdida de masa en el material compuestos a un 11.29%, por otra parte, la nanocelulosa de coco aumentó la pérdida de masa a un 12.29%. SEM también confirmo que al aumento de nanocristales a 0.05 y 0.015% aumentó la microestructura del geopolímero y vuelve más densa y FTIR mostro la presencia de enlaces Si-O-Al.

**Palabras claves:** Geopolímero, nanocelulosa, ecológico fibras de coco, fibras de bagazo de caña de azúcar

## ABSTRACT

Nanocellulose-reinforced geopolymer (NRGP) composites have attracted a lot of attention in the construction industry due to excellent mechanical properties. NRGPs have become an alternative to conventional cement, promoting environmental awareness about releasing less CO<sub>2</sub>. The purpose of this work was to propose an ecological material as a possible alternative to conventional cement, in the same way, its mechanical properties reinforced with 0.025, 0.05 and 0.015 % by weight of nanocellulose (coconut fibers and sugarcane bagasse fibers) were studied. First, the hydrothermal treatment was carried out on both species of fibers, subsequently, an alkaline treatment with NaOH was carried out to increase the cellulose content and finally an ultrasound-assisted acid hydrolysis was carried out to obtain the nanocrystals.

Compression tests were evaluated on each geopolymer sample. Characterization methods such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and thermal analysis (TGA) and IR spectroscopy (FTIR) were also used. The use of 0.05% cellulose nanocrystals in the geopolymer showed an increase in compressive strength of 8.2 and 6.5 Mpa for coconut and cane geopolymers respectively. TGA confirmed that the addition of cane nanocellulose to 0.15 decreased the mass loss in the composite material to 11.29%, on the other hand, coconut nanocellulose increased mass loss to 12.29%. SEM also confirmed that increasing nanocrystals to 0.05 and 0.015% increased the microstructure of the geopolymer and becomes denser and FTIR showed the presence of Si-O-Al bonds.

**Key words:** Geopolymer, nanocellulose, ecological coconut fibers, sugarcane bagasse fibers.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
Índice general .....	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA .....	VIII
índice figuras .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XI
CAPÍTULO 1 .....	1
<b>1</b> Introducción .....	<b>1</b>
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del problema .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General .....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 La biomasa lignocelulósica .....	3
1.5 Selección de la biomasa lignocelulosa .....	5
1.5.1 Celulosa.....	5
1.5.2 Hemicelulosa .....	6

1.5.3	Lignina .....	7
1.5.4	Nanocristales de celulosa .....	7
1.5.5	Geopolímero .....	8
1.5.6	Zeolita .....	8
	Capitulo 2: Materiales y métodos.....	10
2	Metodología.....	10
2.1	Reactivos y materia prima para fabricación de geopolímeros reforzados con nanocelulosa .....	11
2.1.1	Zeolita natural .....	11
2.1.2	Activadores alcalinos .....	11
2.2	Recolección de la biomasa.....	11
2.3	Secado.....	12
2.4	Molienda .....	12
2.5	Purificación de celulosa.....	13
2.6	Tratamiento hidrotérmico.....	14
2.7	Tratamiento alcalino .....	14
2.8	Hidrólisis ácida .....	15
2.9	Preparación de geopolímeros.....	15
2.9.1	Cantidad de muestra y reactivos.....	15
2.9.2	Cantidad de nanocelulosa.....	16
2.9.3	Moldeo de geopolímeros.....	17
2.10	Caracterización.....	18

2.10.1	Microscopio electrónico de barrido (SEM) .....	18
2.10.2	FTIR.....	18
2.10.3	QXRD .....	18
2.10.4	Fuerza de compresión .....	19
2.10.5	TGA Análisis termo gravimétrico/Calorimetría diferencial de barrido.....	19
2.11	Análisis de mercado.....	19
2.11.1	Precios de equipos y materiales .....	20
Capítulo 3.....		21
3	Resultados y análisis .....	21
3.1	Resistencia de Compresión.....	21
3.2	FTI Espectroscopia IR de nanocristales de celulosa y geopolimeros compuestos	23
3.2.1	Bagazo de caña de azúcar.....	23
3.2.2	Fibra de coco .....	24
3.2.3	FTIR Geopolímero y Geopolimeros compuestos.....	25
3.3	Difracción de rayos X de la materia prima y de geopolimeros compuestos .....	26
3.4	Estabilidad térmica de geopolimeros con y sin reforzamiento.....	27
3.5	Micrografías SEM de la matriz de geopolímero .....	28
3.6	Análisis económico.....	30
3.6.1	Cálculos de costos en Capcost .....	30
3.6.2	Selección del geopolímero con reforzamiento más eficiente .....	31
3.6.3	Análisis de costos del geopolímero con 0.025 de nanocelulosa de caña ....	34

Capítulo 4.....	37
4 Conclusiones y recomendaciones.....	37
4.1 Conclusiones.....	37
4.2 Recomendaciones.....	39
5 Bibliografía.....	40
6 Anexos.....	43

## ABREVIATURAS

FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier
SEM	Microscopía electrónica de barrido
XRD	Difracción de rayos X
TGA	Análisis termogravimétrico
BL	Biomasa Lignocelulósica
OPC	Cemento Portland
GPNC	Geopolímeros reforzados con nanocelulosa
Ncca	Nanocelulosa de bagazo de caña
Ncco	Nanocelulosa de fibras de coco
NASH	Aluminosilicato de sodio hidratado
Gco	Geopolímero reforzado con nanocelulosa de coco
Gca	Geopolímero reforzado con nanocelulosa de caña
EDS	Sistema de dispersión de energía

## SIMBOLOGÍA

g	Gramos
°C	Grados Centígrados
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
pH	Potencial de hidrogeno
[SO <sub>4</sub> ] <sup>-4</sup>	Iones Silicato
[AlO <sub>4</sub> ] <sup>-5</sup>	Iones Aluminatos
m	Metros
wt%	Porcentaje en peso
p/v	Relación peso volumen
rpm	Revoluciones por minuto
ml	milímetros
cm	centímetros
NaOH	Hidróxido de sodio
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
M	Molar
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Silicato de Sodio
%	Porcentaje

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1 Procedimiento de elaboración de Geopolimeros compuestos .....	10
Figura 2.2 Fibras de coco y bagazo de caña de azúcar recolectados .....	12
Figura 2.3 Cantidad de biomasa y componentes lignocelulósicos para extracción.....	13
Figura 2.4 Geopolimeros reforzados con nanocelulosa de coco y caña de azucar .....	17
Figura 3.1 Fuerza de compresión de geopolimeros .....	21
Figura 3.2 Densidad observada de geopolímeros .....	22
Figura 3.3 FTIR Caña de azúcar .....	23
Figura 3.4 FTIR Fibras de coco.....	24
Figura 3.5 FTIR Geopolimeros .....	25
Figura 3.6 Micrografías SEM de la matriz de geopolímero sin reforzamiento .....	29
Figura 3.7 Micrografías SEM de la matriz de geopolímero con reforzamiento: a)0.025, b)0.05, c)0.15, d)0.15 % nanocelulosa de caña .....	29
Figura 3.8 Micrografías SEM de la matriz de geopolímero con reforzamiento: a)0.025, b)0.05, c)0.15, d)0.15 % nanocelulosa de coco .....	30
Figura 3.9 Diagrama de flujo de Efectivo.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Componentes de la biomasa lignocelulósica .....	3
Tabla 1.2 Composición porcentual de la biomasa .....	5
Tabla 2.1 Precios de productos utilizados para la elaboración de geopolimeros compuestos ..	20
Tabla 2.2 Precios de productos utilizados para la elaboración de geopolimeros compuestos ..	20
Tabla 3.1 Nomenclatura de las muestras analizadas .....	23
Tabla 3.2 Información mineralógica de materia prima y sus correspondiente geopolimeros ....	26
Tabla 3.3 Pérdida de masa de geopolímeros con respecto a la temperatura .....	27
Tabla 3.4 Análisis del cálculo de costos en Capcost .....	31
Tabla 3.5 Flujos y Ganancia con respecto al porcentaje de nanocelulosa de caña .....	32
Tabla 3.6 Flujos y Ganancia con respecto al porcentaje de nanocelulosa de coco .....	33
Tabla 3.7 Información Económica de la planta.....	34

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A 1 Difractograma de Zeolita.....	43
Anexo A 2 Difractograma de geopolimero sin reforzamiento.....	44
Anexo A 3 Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de coco 0.025%)	45
Anexo A 4 Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de coco 0.05%) ..	46
Anexo A 5 Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de coco 0.15%) ..	47
Anexo A 6 Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de caña 0.025%)	48
Anexo A 7 Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de caña 0.05%) ...	49
Anexo A 8 Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de caña 0.15%) ..	50
Anexo B 1 Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa coco 0.025).....	51
Anexo B 2 Termograma Geopolímero con reforzamiento(nanocelulosa coco 0.05) .....	52
Anexo B 3 Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa coco 0.15) .....	53
Anexo B 4 Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa caña 0.025) .....	54
Anexo B 5 Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa caña 0.05) .....	55

## CAPÍTULO 1

### 1 Introducción

#### 1.1 Descripción del problema

En la actualidad, los líderes mundiales han decidido priorizar la producción de alimentos, energía y obtención de materiales de construcción, como es el caso del cemento Portland. Para el año 2050, se estima que la población humana superará los 10000 millones (Adejumo et al., 2020), por lo que es necesario satisfacer la demanda de materiales y alimentos sin comprometer los recursos actuales. Del mismo modo, reducir emisiones, efluentes y desechos sólidos que perjudican tanto al ambiente como al ser humano (Scarlat et al., 2015).

Con el incremento de la actividad agrícola en el Ecuador, cada año se generan toneladas de residuos sólidos por parte de las industrias que se dedican al procesamiento de biomasa. El procesamiento de productos agrícolas genera, a su vez, la subproducción de una cantidad considerable de desechos que en la mayoría de los casos no son aprovechados correctamente. En algunos casos, las actividades del sector agrícola generan desechos sólidos que se acumulan indiscriminadamente, generando molestias para la salud de las personas y una amenaza a la seguridad alimentaria. Estos desechos pueden ser quemados y producir material particulado, generando contaminación en grandes extensiones de tierra cultivables o utilizables. E incluso pueden hallarse vertidos en efluentes de agua contaminando especies (Westerman & Bicudo, 2005).

La fabricación del cemento consume gran cantidad de materia prima, además, emite entre un 5-7% de CO<sub>2</sub> al ambiente siendo responsable del calentamiento global (Wang et al., 2015). Ecuador al ser país agrícola tiene la facilidad de implementar nuevas y beneficiosas alternativas para la elaboración de productos a partir de su biomasa. Sobre la base de esta problemática y la necesidad de encontrar nuevos mercados en el Ecuador, existe la posibilidad de plantear alternativas para la reutilización de estos subproductos, los cuales poseen alto

contenido de componentes químicos que se los puede utilizar para desarrollar un proceso sostenible, un caso particular sería el uso de residuos orgánicos para reforzar las propiedades mecánicas de materiales poliméricos (geopolímero), el cual es un potencial sustituto del cemento portland. Además, permite dar un valor agregado a este subproducto mejorando la economía significativamente y minimizando impactos ambientales.

## **1.2 Justificación del problema**

Los residuos agrícolas cuentan con un gran potencial para ser utilizados en diferentes procesos, que involucren la elaboración de nuevos productos o agregar algún tipo de valoración a los originales de cuales se los obtuvieron (Viaggi, 2022). Dado que existe la necesidad de crear materiales innovadores que minimicen la contaminación al medio ambiente y que posean propiedades únicas como la biodegradabilidad y la renovabilidad se presenta la siguiente propuesta:

El presente trabajo pretende dar una alternativa de utilización de los desechos sólidos agrícolas provenientes de la caña de azúcar y del coco; transformándolos en nano celulosa, material que posee diversas aplicaciones, una de estas para el reforzamiento de geopolímeros para mejorar sus propiedades físicas-químicas. Adicionalmente, este trabajo promueve al desarrollo de los geopolímeros siendo posible sustituto al cemento Portland por a sus altas propiedades mecánicas y beneficio ambiental (Okoye, 2017).

Además, esta propuesta busca valorar económicamente los beneficios de los residuos agrícolas en el Ecuador, aunque estos desechos poseen características químicas y biológicas las cuales permiten desarrollo de tecnologías sustentables. Actualmente, en el país no existe estudios realizados sobre la obtención de nano celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar y fibras de coco, así mismo la aplicación de este componente en los geopolímeros siendo este el objetivo primordial de este proyecto.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Preparación de geopolímero basado de zeolita natural reforzados con nanocristales de celulosa de bagazo y fibras de coco a diferentes proporciones comparando sus propiedades mecánicas con geopolímero sin reforzamiento.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar mediante FTIR, SEM, XRD y TGA las propiedades físicas, químicas y morfológicas del geopolímero reforzado.
- Medir las propiedades mecánicas de los geopolimeros reforzados estableciendo relaciones entre el uso de nanocelulosa con respecto a la fuerza de compresión.
- Estimar los costos de producción de nanocristales de celulosa preparados a partir del bagazo de caña y fibras de coco.

### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 La biomasa lignocelulósica**

La biomasa lignocelulósica (BL) se comprende a los materiales de origen vegetal, incluidas las formas de biomasa virgen como árboles, arbustos, pastos; biomasa de desecho como residuos de cultivos, residuos agroindustriales, residuos forestales, etc. (Owonubi et al., 2021a). Debido a su disponibilidad y bajo costo son la fuente más favorable y sostenible de materia para la producción de bioquímicos (Pradhan et al., 2022). Existen varias fuentes lignocelulósicas de las cuales podemos obtener celulosa. La biomasa lignocelulósica se compone principalmente de biopolímeros como celulosa, hemicelulosa y lignina.

#### **Tabla 1.1**

*Componentes de la biomasa lignocelulósica*

<b>Celulosa</b>	<b>Hemicelulosa</b>	<b>Lignina</b>
Polisacárido homogéneo	Polisacárido heterogéneo	Compuestos aromáticos heterogéneos
Más abundante en la naturaleza.	Hidrolizado por ácido o base diluidos.	Segundo más abundante en la naturaleza
Insoluble en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos	No soluble en agua	Insoluble en agua, pero soluble en ácido/álcali
Semicristalina con alta linealidad	Aleatoriamente amorfo y ramificado	Estructura amorfa completamente reticulada y muy ramificada
Buenas propiedades químicas y térmicas.	Mala propiedad térmica y mala propiedad mecánica.	Malas propiedades térmicas y mecánicas
Grado de polimerización entre y 5000 y 15000	Grado de polimerización entre 200 y 3000	El grado de polimerización es difícil de medir.
Altamente lineal	De naturaleza ramificada	De naturaleza muy ramificada

Fuente: Marakana et al., (2021); Rana et al., (2021); Song et al., (2019).

En términos generales, la composición de la lignocelulosa depende en gran parte de su fuente, ya sea que se derive de madera dura, madera blanda o pastos. En la tabla 1.2 muestra las composiciones químicas típicas de estos tres componentes en varios materiales lignocelulósicos que varían en composición debido a la variabilidad genética entre diferentes fuentes. Frecuentemente, los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina en la biomasa lignocelulósica típica se encuentran dentro del rango de 30-60, 20-40 y 15-25%, respectivamente (Zoghiami & Paës, 2019). La celulosa es un componente estructural principal de las paredes

celulares de las plantas, responsable de la resistencia mecánica, mientras que las macromoléculas de hemicelulosa son polímeros repetidos de hexosas y pentosas. La lignina posee tres alcoholes aromáticos en su estructura (alcohol coniferílico, alcohol sinapílico y alcohol p-cumarílico) resultado de un proceso biosintético, también tiene la función de sello protector forma un sello protector de los otros dos componentes, es decir, celulosa y hemicelulosas (Anwar et al., 2014).

**Tabla 1.2**

*Composición porcentual de la biomasa*

Biomasa	Composición (peso%)		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Algodón	89,7	1	2,7
Linaza	80	13	2
Paja de arroz	37	38	22
Bagazo de caña de azúcar	47	20	20
Cáscara de arroz	31	24	14
Paja de trigo	30	21	17
Fibras de coco	44	12	33

Fuente: Marakana et al., (2021); (Owonubi et al., 2021).

## **1.5 Selección de la biomasa lignocelulosa**

### **1.5.1 Celulosa**

Al ser el principal componente de los vegetales y plantas, la celulosa es el biopolímero más abundante en la naturaleza. Las propiedades fisicoquímicas principales de la celulosa son el grado de polimerización, la porosidad y la cristalización. La celulosa es un homopolisacárido lineal que se conforma de unidades de glucopiranososa anhidra unidas entre sí por enlaces glucosídicos  $\beta$ -1,4 donde las unidades repetitivas son dos monómeros de glucosa llamados (Moradbak et al., 2018).

Cada unidad repetitiva tiene tres grupos hidroxilo que forman fuertes enlaces de hidrógenos inter e intramoleculares con unidades de glucosa de extremo a extremo, ya sea en la misma cadena o en una cadena diferente (Owonubi et al., 2021). La celulosa se conforma por moléculas completamente lineales y tienen una fuerte tendencia a formar enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares. Los paquetes de moléculas de celulosa se agregan así en forma de microfibrillas, en las que las regiones altamente estructuradas (cristalinas) se alternan con regiones menos ordenadas (amorfos). Como consecuencia de su estructura fibrosa y fuertes enlaces de hidrógeno, la celulosa es insoluble en la mayoría de los solventes y posee una alta resistencia a la tracción (Aholá et al., 2008; Moradbak et al., 2018).

### **1.5.2 Hemicelulosa**

Las hemicelulosas se encuentran en los dominios no cristalinos de la lignocelulosa y son los segundos constituyentes más grandes de LB después de la celulosa. Las hemicelulosas muestran una estructura compleja y están formadas por varios derivados diferentes de pentosas (arabinosa y xilosa), hexosas (galactosa, fucosa, glucosa, metilglucosa y manosa y ramnosa) y ácido glucolítico (ácido de fermentación de glucosa, metilglucosa y ácido galacturónico) (Owonubi et al., 2021).

Los dos tipos principales de unidades de azúcar presentes en las hemicelulosas son xilanos y glucomananos. La hemicelulosa está conectada a las fibrillas de celulosa a través de

enlaces de hidrógeno e interacciones de van der waals. Además, también está reticulado con lignina (Marakana et al., 2021a). Por lo tanto, las hemicelulosas desempeñan un papel crucial en la estructura de la pared celular al incrustarse entre la celulosa y la lignina. Las hemicelulosas se pueden eliminar de biomasa lignocelulósica mediante un tratamiento previo con álcali, ácido diluido (Rana et al., 2021).

### **1.5.3 Lignina**

La lignina es el segundo polímero más abundante en las fibras vegetales y tiene como objetivo otorgar protección contra la humedad y los agentes atmosféricos, también funciona como elemento aglomerante de las fibras. La lignina es una característica de las plantas superiores (gimnospermas y angiospermas), se encuentran en los tejidos vasculares y se especializan la resistencia mecánica y en el transporte de líquido. La lignina tiene una estructura polimérica tridimensional amorfo (Rynk et al., 2022).

### **1.5.4 Nanocristales de celulosa**

Los nanocristales de celulosa son un tipo de nanomaterial derivado de la celulosa, poseen muchas propiedades deseables, como una resistencia mecánica excepcional, biocompatibilidad, biodegradabilidad, alta superficie específica, etc. (Li et al., 2016). Las propiedades distintivas de los nanocristales de celulosa los convierten en un material excepcional por sus diversas aplicaciones, por ejemplo, como agentes de refuerzo, implantes biomédicos y modificadores reológicos (Song et al., 2019). Los nanocristales de celulosa pueden ser obtenidos a partir de madera, fibras no leñosas, algas, tunicados y residuos agroindustriales o biomasa. Sin embargo, los residuos agroindustriales celulósicos o la biomasa son las fuentes más prometedoras debido a su bajo costo y disponibilidad (Owonubi et al., 2021d).

### **1.5.5 Geopolímero**

Se denomina geopolímeros a los materiales poliméricos inorgánicos, constan de una red tridimensional compuesta por unidades tetraédricas reticuladas de  $[AlO_4]$  y  $[SiO_4]$  y cationes de metales alcalinos (Jia et al., 2020). Se forman mezclando una solución alcalina con un sólido seco (aluminosilicato) y otros constituyentes, si es necesario. Para la producción de geopolímeros se utilizan varios materiales que posean un alto contenido de silicio y aluminio. Las posibles materias primas incluyen minerales naturales, zeolitas, arcillas calcinadas, residuos y subproductos industriales, como cenizas volantes, escorias, lodo rojo o residuos de vidrio, o la mezcla de estos materiales (Burduhos Nergis et al., 2018).

El principal campo de aplicación de la tecnología de los geopolímeros es actualmente el desarrollo de materiales de construcción con emisiones reducidas de  $CO_2$  como alternativa a los cementos a base de Portland (silicato cálcico) (Provis & van Deventer, 2009). La selección y preparación de las materias primas determina las propiedades de los productos geopolímeros finales. Estas características pueden incluir buenas propiedades mecánicas, alta resistencia a la compresión, baja contracción, baja conductividad térmica y resistencia a los ácidos (Mucsi & Ambrus, 2018).

### **1.5.6 Zeolita**

Se define a las zeolitas como sólidos cristalinos microporosos con estructuras bien definidas. Generalmente contienen silicio, aluminio y oxígeno en su estructura y cationes, agua y/u otras moléculas dentro de sus poros. Debido a sus propiedades porosas únicas, las zeolitas se utilizan en diversas aplicaciones, como el craqueo petroquímico, el ablandamiento y la purificación del agua, y en la separación y eliminación de gases y disolventes (Möller & Bein, 2013). Muchas zeolitas son minerales naturales que se extraen en muchas partes del mundo.

Otras son sintéticas, se fabrican comercialmente para usos específicos o las producen científicos que intentan comprender mejor su química (Majidi, 2013).

La Zeolitas se puede encontrar en cualquier yacimiento sedimentario, lo cual es frecuente en rocas que se han formado total o parcialmente por la transformación de materiales volcánicos, entonces, las zeolitas son abundantes en zonas donde la actividad volcánica fue activa en un pasado geológico reciente. Un buen lugar donde se puede adquirir zeolita es en Manglar alto en la provincia de Santa Elena (Enrique & Carballo, 2004).

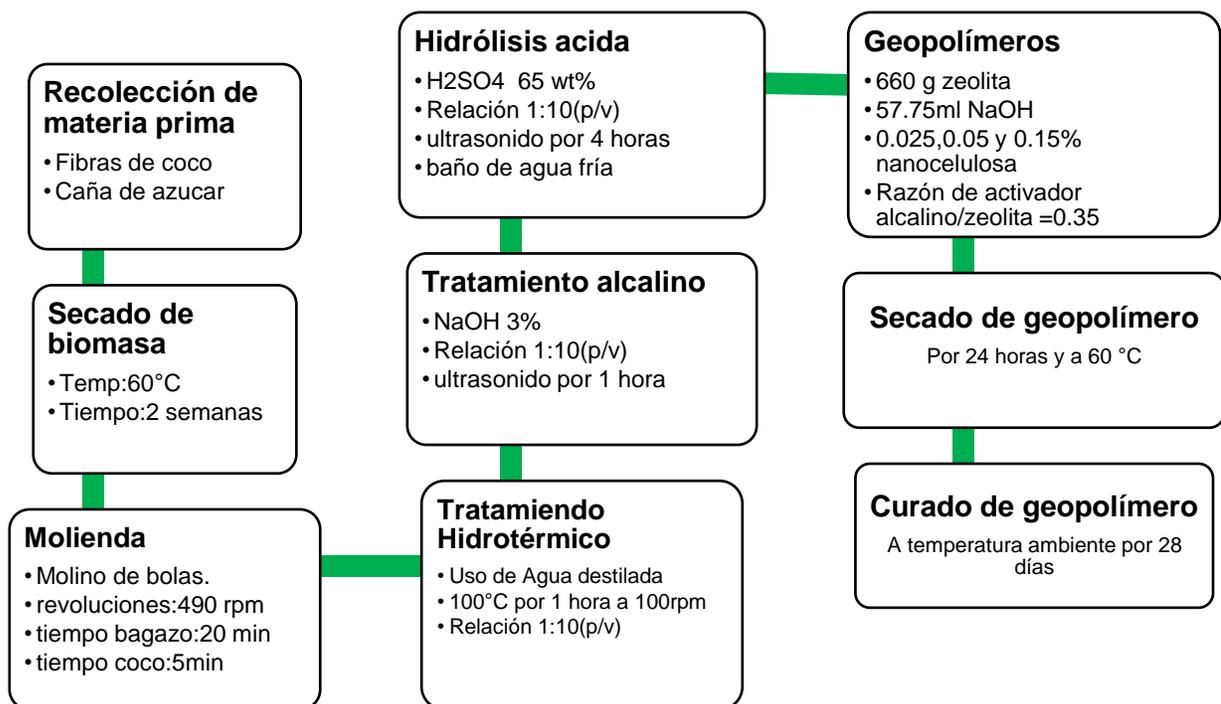
## CAPITULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

### 2 Metodología

A partir de revisión bibliográfica, se seleccionó la biomasa lignocelulósica con alto contenido de celulosa. Posteriormente, fueron recolectadas, secadas y pulverizadas previo a la experimentación. La experimentación consta de dos partes: Obtención de nanocristales de celulosa y elaboración de Geopolímero compuesto

**Figura 2.1**

*Procedimiento de elaboración de Geopolimeros compuestos*



## **2.1 Reactivos y materia prima para fabricación de geopolímeros reforzados con nanocelulosa.**

### **2.1.1 Zeolita natural**

La Zeolita natural que se utilizó en el proceso fue proveniente de la empresa ZEONATEC S.A. Esta empresa produce y comercializa tres tipos de zeolitas industriales, siendo MINEPLUS, CATFERTIL y FILTROCEL, donde se utilizó la zeolita de nombre comercial MINEPLUS, debido a que sus minerales aluminosilicatos son altamente cristalinos y al momento de deshidratarse los cristales toman un tamaño de partícula muy pequeña, su estructura está conformada por  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$  y modernita.

### **2.1.2 Activadores alcalinos**

En general se utilizan soluciones de sales alcalinas. Los activadores tienen como finalidad acelerar la solubilización del aluminosilicato de la zeolita. Los activadores más utilizados resultan de la combinación de hidróxido de sodio con silicato de sodio. El hidróxido de sodio es un sólido incoloro, higroscópico y altamente corrosivo, reacciona violentamente con el agua y es exotérmico. El hidróxido empleado para el proyecto es de la marca MERCK (Alemania), el cual tiene una pureza del 99%. Para el proceso de geopolimerización se utilizaron dos soluciones de NaOH una a 10 M y otra a 3%. El silicato de sodio utilizado es de marca MERK con una pureza entre 25.5% y 28.5%.

## **2.2 Recolección de la biomasa**

El bagazo de caña de azúcar se recolecto durante 3 días en el laboratorio de producción del Ingenio azucarero San Carlos, el cual está ubicado en el cantón Cnel. Marcelino Maridueña. El bazo era una mezcla de varias muestras recogidas cada 4 horas. Las Fibras de cocos fueron recolectada en dos tiendas dedicadas a la venta de productos comestibles de coco en la ciudad

de Milagro. La cantidad recolectada de bagazo de caña y fibras de coco fue de aproximadamente 1 kg.

## Figura 2.2

*Fibras de coco y bagazo de caña de azúcar recolectados*



### 2.3 Secado

Las especies fueron dispersadas en bandejas de aluminio y colocadas en una estufa MEMMERT modelo UNB 500 a 60°C durante 2 semanas. Esto se realizó con el fin de eliminar la mayor cantidad de humedad presente en la muestra, facilitando la molienda para obtener fibra en polvo.

### 2.4 Molienda

En este proceso se pulverizó las fibras de bagazo y de coco con un molino planetario de bolas PM 100 marca Retsch. Primeramente, se cortó en pequeñas tiras las fibras para facilitar la molienda. Se colocaron aproximadamente 7 gramos de tiras de fibras en un recipiente cilíndrico hueco, el cual contiene 6 bolas de Corindón sinterizado. La colisión de alta energía entre las bolas pulverizaba las fibras a medida que giraba el recipiente en el interior del molino.

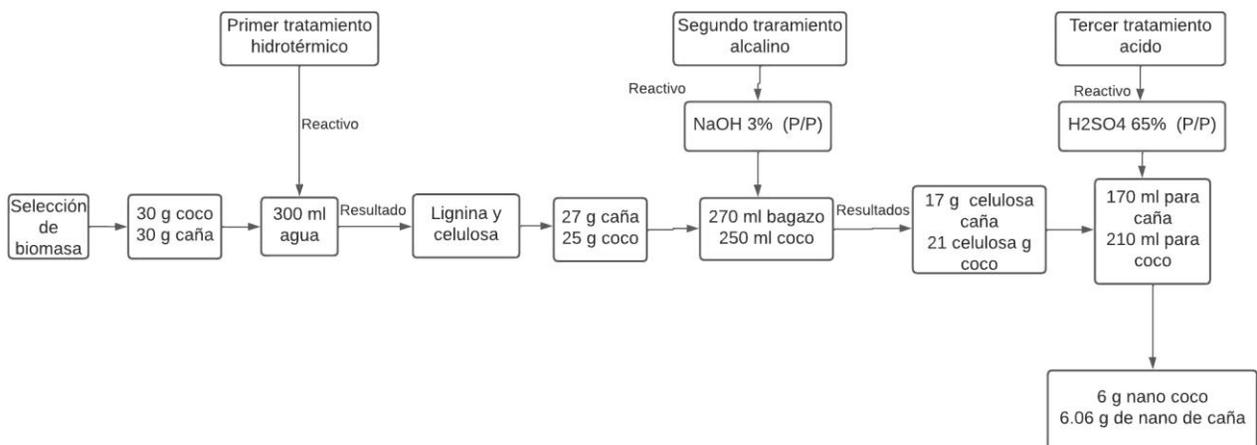
El tiempo aproximado de molienda para el bagazo de caña de azúcar fue de 20min a 490rpm a temperatura ambiente, debido al alto contenido de celulosa en la fibra de caña. Para las fibras de coco, se utilizó un aproximado de 5 min a 490rpm a temperatura ambiente. El tiempo total de molienda fue de aproximadamente 16 horas, dejando un intervalo de 20 min entre cada molienda.

## 2.5 Purificación de celulosa

En la biomasa de coco y caña se encuentran varios componentes lignocelulósicos, entre los más importantes y abundantes están, la hemicelulosa, lignina y celulosa, sin embargo, el interés se centra únicamente en la celulosa, por lo que los otros dos componentes deben ser removidos o extraídos por medio de tratamientos hidrotérmico, alcalino y ácido, la **figura 2.3** ilustra la relación del reactivo necesario para para cada muestra.

**Figura 2.3**

*Cantidad de biomasa y componentes lignocelulósicos para extracción*



## **2.6 Tratamiento hidrotérmico**

El tratamiento hidrotérmico consiste la degradación parcial de la hemicelulosa y compuestos orgánicos existentes en la biomasa en presencia de agua, la cual se encuentra a una temperatura de 100°C y a presión atmosférica. Como se muestra en la figura 2.3 para este proceso se utilizó 30 g de fibra seca de coco y caña respectivamente y se trabajó con una relación de 1:10 (p/v) (Bondancia et al., 2022).

El sistema se llevó a cabo en una plancha de agitación con calentamiento durante aproximadamente una hora. El agua evaporada en el proceso se reponía en periodos de 5 a 10 min. Se utilizó un termómetro de mercurio, para controlar la temperatura y que se mantenga en un margen de 100°C. Una vez que se finalizó la hora, se procedió a separar la suspensión generada.

Se utilizó una centrifuga de 5500 rpm de marca Biobase, para separar la suspensión generada a partir del tratamiento hidrotérmico. La disolución se centrifugó a 4000 rpm durante 4 min a 20°C y se midió el pH de la suspensión. El pH de la muestra oscilaba en los valores 6 y 7 debido a que se utilizó agua destilada para el tratamiento, al tener un pH neutro no fue necesario realizar lavados. Por último, el precipitado resultante fue colocado en un beaker y puesto al horno a una temperatura de 60°C durante 24 horas.

## **2.7 Tratamiento alcalino**

Para aislar la celulosa se empleó el tratamiento alcalino, lo cual permitió la eliminación de remanentes de hemicelulosa que quedaron del tratamiento hidrotérmico y remoción completa de lignina. Eliminando, tanto para el bagazo como para la fibra de coco. La pasta seca que se obtuvo del proceso hidrotérmico en ambas especies fue tratada con una solución alcalina de hidróxido de sodio al 3% (w/w) en una relación de peso volumen de 1:10 (p/v).

Así mismo, el sistema fue asistido por un procesador ultrasónico de alta intensidad de 130 watt y 20khz a Apml de 75 % durante una hora. Para eliminar el hidróxido de sodio que se había adherido a la superficie de la torta sólida, se realizaron varios lavados utilizando la centrífuga, a 4000 rpm durante 4 min hasta lograr un pH neutro. Después lavar el residuo sólido, se secó en un horno a 60°C durante 24 horas.

## **2.8 Hidrólisis ácida**

La hidrólisis ácida es el método químico más sencillo para la producción de nanocelulosa a partir de materiales celulósicos. La celulosa obtenida en el proceso alcalino fue hidrolizada con ácido sulfúrico a 65% (w/w) y asistida con procesador ultrasónico de alta intensidad de 130 watt y 20khz a un Apml de 75% durante 4 horas. La relación de ácido a celulosa fue de 1:10(p/v) (Bondancia et al., 2022). Para evitar el sobrecalentamiento en el sistema, el recipiente con la disolución fue puesto en un baño de hielo.

Para detener la hidrólisis ácida de la nanocelulosa obtenida se sumergió la muestra en agua destilada, aumentar el pH a neutro de la muestra es necesario para que no se queme o hidrolice; para esto se realizó repetidos lavados con agua destilada con la centrífuga a 4.000 rpm durante 4 min, cabe recalcar que el sedimento de los lavados es de interés ya que es la nanocelulosa, mientras que el sobrenadante se desecha. El precipitado resultante se secó durante aproximadamente 72 horas hasta tener una pasta dura la cual fue pulverizada en un molino planetario de bolas. Esté es el proceso final para la obtención de nanocristales de celulosa tanto para el bagazo de caña de azúcar como para la fibra de coco.

## **2.9 Preparación de geopolimeros**

### **2.9.1 Cantidad de muestra y reactivos**

El activador alcalino es esencial para la elaboración de geopolímeros, ya que los silicatos presentes en la solución activadora se transforman en redes de Si-Al-Si dentro de la matriz del geopolímero formando geles, esta acción del activador reduce el volumen de los poros en el geopolímero. La relación activadora/aglutinante utilizada fue de 0.35, ya que esta permite una óptima adherencia de la nanocelulosa en la matriz del geopolímero (Richa Ferreira et al., 2021). Entendiendo esto se elaboraron tres morteros de 220 g de zeolita para cada porcentaje de nanocelulosa, manteniendo la misma cantidad de activadores alcalino. los cálculos se los realizo de la siguiente manera:

$$220g * 0.35 \frac{ml \text{ activador}}{g} = 77ml \frac{ml}{cubo}$$

La cantidad de solución activadora por cubo fue de 77 ml. Para este trabajo, se utilizaron 3 cubos para cada porcentaje de nanocelulosa (0.025,0.05y 0.15 %)(Jia et al., 2020), los cuales fueron establecidos a partir de bibliografía (Jia et al., 2020). Por lo que, el valor de 77 se multiplicó por 3 dando un resultado de 231 ml de solución activadora. Se estableció una relación 1:3 (w/v).

### **2.9.2 Cantidad de nanocelulosa**

La cantidad de nanocelulosa se calculó de la misma manera para el bagazo de caña y la fibra de coco, basándose en el valor de 220g de referencia, el cual se multiplico por los porcentajes en masa de nanocelulosa establecidos por la cantidad de zeolita requerida:

- $220g \times 0.025\% \times 3 = 0.165$  g de nanocelulosa
- $220g \times 0.05\% \times 3 = 0.33g$  de nanocelulosa
- $220g \times 0.15\% \times 3 = 0.99$  g de nanocelulosa

Dichos porcentajes en masa de nanocelulosa se basa en la búsqueda de mejorar las propiedades del geopolímero como el aumento de la fuerza de compresión, pero se debe detallar, que valores

por encima del 1% en la matriz del geopolímero causa un aglutinamiento de las partículas (Rocha Ferreira et al., 2021).

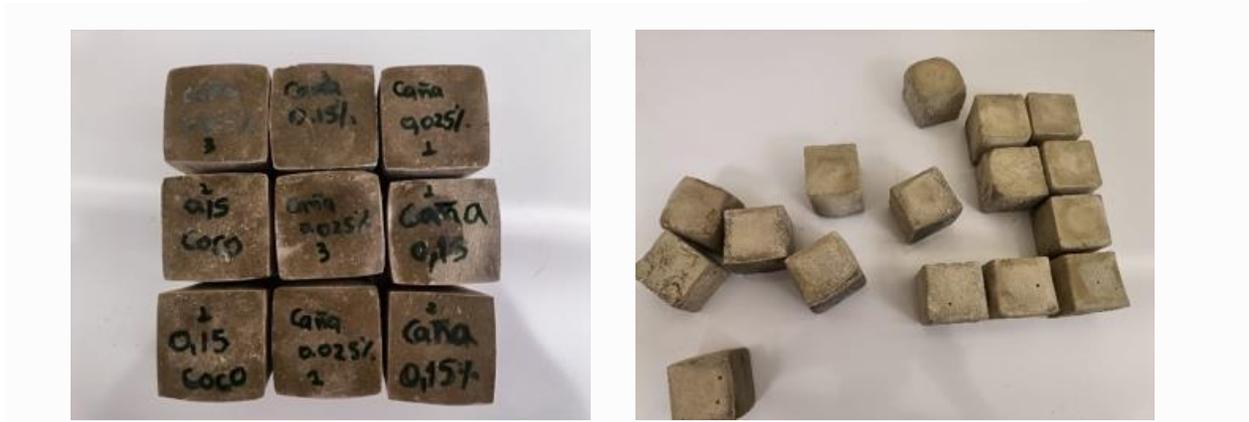
### 2.9.3 Moldeo de geopolimeros

En este proceso, se elaboraron 6 tríos de geopolimeros, los cuales dependían del porcentaje de nanocelulosa requerida. Primeramente, se mezcló la nanocelulosa con la solución activadora, se mantuvo una agitación constante hasta que la disolución se homogenizara. Para fabricar los 3 geopolimeros se utilizó 660 gramos de zeolita en total. Los materiales se mezclaron hasta que se formó una pasta uniforme.

A continuación, la pasta se decantó en los moldes de silicona, se colocaron en un horno a una temperatura de 60°C durante 24 horas exactas. Pasado este tiempo, los geopolimeros fueron retirados en los moldes y puestos en una bandeja de madera. El curado consiste en dos partes fundamentales, la primera a 60C° por 24 horas y la segunda a temperatura ambiente por 28 días, una vez alcanzado el tiempo de curado se procedió a caracterizarlos

**Figura 2.4**

*Geopolimeros reforzados con nanocelulosa de coco y caña de azucar*



## **2.10 Caracterización**

Una parte fundamental del proceso fue la caracterización de la materia prima que son las fibras de caña, coco y zeolita, de esta forma se respalda la pureza de los materiales y su incidencia en el proceso. Al momento que se extrajo la nanocelulosa de las fibras naturales y los geopolímeros alcanzaron su tiempo de curado, se procedió también a caracterizarlos ya que esto permite evidenciar que el procedimiento es correcto y los resultados son los esperados, pero sobre todo permite entender el comportamiento de los materiales y como se ven afectados al combinarlos o cambiarlos.

### **2.10.1 Microscopio electrónico de barrido (SEM)**

El modelo SEM FEI INSPECT se utilizó para caracterizar la microestructura, cabe recalcar que también se caracterizó la nanocelulosa extraída de las fibras naturales, así como los geopolímeros a base de zeolita con nanocelulosa de caña y coco a diferentes proporciones.

### **2.10.2 FTIR**

Spectrum modelo 100 FTIR PERKIN ELMER se utilizó en la caracterización de las vibraciones de ondas, estiramiento y flexión de grupos funcionales y transformación de los grupos funcionales de las fibras naturales, los componentes lignocelulósicos y los geopolímeros de zeolita con partículas de nanocelulosa.

### **2.10.3 QXRD**

La difracción de rayos X se utilizó para cuantificar las fases cristalinas y amorfas de la materia prima y los geopolímeros, mediante el método de refinamiento de Rietveld. Es un método no destructivo, se caracteriza por requerir dosis pequeñas de muestra y reportar resultados con

rapidez, lo cual la convierte en un instrumento de análisis óptimo (Song et al., 2019). Se utilizó un difractómetro de modelo X'pert marca PANanalytical.

#### **2.10.4 Fuerza de compresión**

Una de las pruebas más importante a la que se sometió los geopolímeros es a la fuerza de compresión, ya que esta prueba permite visualizar que tan resistente es nuestro geopolímero y cómo cambia su resistencia cuando posee diferentes porcentajes de nanocelulosa disuelto en su interior. De forma fundamental se busca que el geopolímero posea una mayor resistencia a la compresión, ya que permitirá en un futuro construcciones arquitectónicas más seguras y confiables. En el ensayo de tracción se usó una máquina de marca SHIMADZU modelo UTM-600KNI.

#### **2.10.5 TGA Análisis termo gravimétrico/Calorimetría diferencial de barrido**

Los análisis de calorimetría diferencia y termo gravimétrico se realizan simultáneamente. Por acción de la temperatura, se cuantifica el peso de la muestra y cambios de fase. El equipo de marca TA modelo Q600 se utilizó para la caracterización.

### **2.11 Análisis de mercado**

Un factor importante para este proyecto es la segmentación del mercado y es que la industria cementera es muy amplia en el Ecuador, entonces se escogió la fabricación de bloques de cemento, ya que por su naturaleza e innovación los geopolímeros pueden ser un gran sustituto de este material de construcción. Entonces, se eligió los datos de un proyecto en de una constructora en la ciudad de Cuenca, que tuvo como objetivo la construcción de 65 viviendas sociales y en el que se utilizó 72000 unidades de bloques, esta cantidad de bloques producidos se lo distribuye por 250 bloques diarios, se debe considerar que el proyecto se lo plantea a escala

piloto, donde la producción no es excesiva. La propuesta se la planteó debido a que en la ciudad no hay muchas empresas que ofrezcan bloques y productos cementicos de calidad, por otra parte, la empresa Disensa que producen todo tipo de productos cementicos y de buena calidad es un gran proveedor, sin embargo, la fábrica al encontrarse en la ciudad de Guayaquil dificulta su rápida obtención (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2019).

### 2.11.1 Precios de equipos y materiales

**Tabla 2.1**

*Precios de productos utilizados para la elaboración de geopolimeros compuestos*

Productos químicos	\$/kg	Fuente
Hidróxido de sodio	0.40	Merck
Ácido sulfúrico	2	Merck
Silicato de sodio	0.45	Merck
Zeolita	0.1	Zeanotec
Fibras naturales	0.1	

**Tabla 2.2**

*Precios de productos utilizados para la elaboración de geopolimeros compuestos*

Equipo	Precio	Fuente
Estufa	\$30,000.00	Alibaba
Molino planetario de bolas	\$12,000.00	Alibaba
Centrífuga	\$19,800.00	CapCost
Plancha de calentamiento y agitación	\$2,200.00	Alibaba
Procesador ultrasónico	\$4,700.00	Alibaba
Mezclador	\$92.00	CapCost
<b>Total</b>	<b>\$68,792.00</b>	

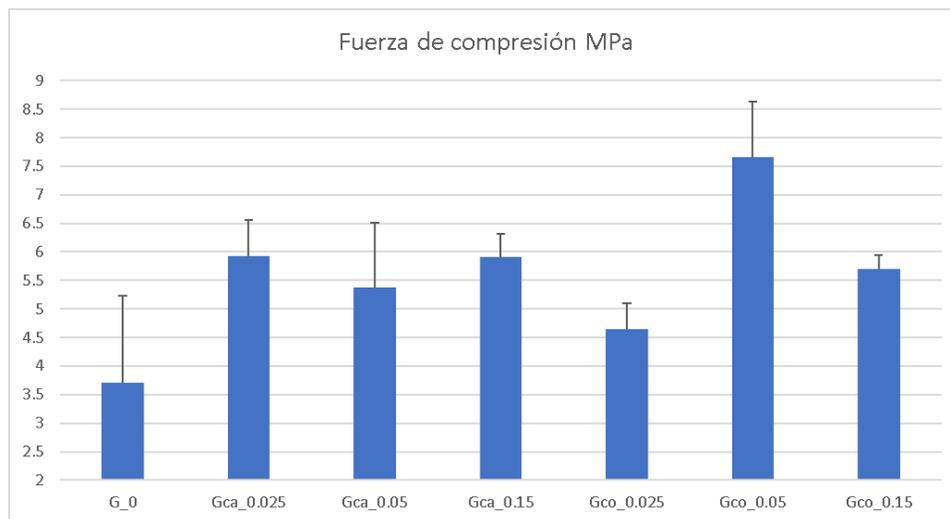
## CAPÍTULO 3

### 3 Resultados y análisis

#### 3.1 Resistencia de Compresión

Figura 3.1

*Fuerza de compresión de geopolímeros*

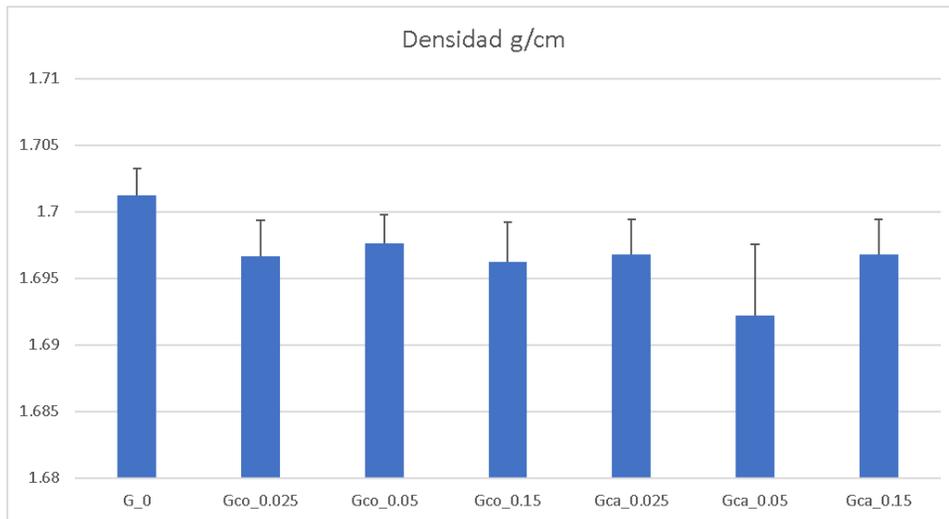


La figura 3.1 muestra la fuerza de compresión que se sometió los geopolímeros, según su porcentaje de nanocelulosa en su matriz, todos los geopolímeros con reforzamiento obtuvieron valores mayores de fuerza de compresión que G\_0, esto se debe a la microestructura de la nanocelulosa, que permite que se adhiera fácilmente en los abundantes nano poros presente en el geopolímero brindando soporte estructural a la matriz convirtiéndola más densa y resistente. Sin embargo, se evidencia que los valores de compresión de Gca\_0.05 no son acordes al resto de los resultados, esto se debe a que para este ensayo se utilizaron un tipo de moldes distintos del resto, los moldes disminuyeron el tamaño de los bloques, por lo que la matriz del geopolímero quedó más compactada dando como resultado que la fuerza de compresión sea mucho mayor para este caso. Se evidencia también que las desviaciones estándar de los

geopolímeros son menores a 2, lo cual indica que los datos están concentrados y menos dispersos con relación al promedio de cada uno (Chen et al., 2022).

### Figura 3.2

*Densidad observada de geopolímeros*



La figura 3.2 representa el promedio de densidad de cada tipo de geopolímero, según su porcentaje de nanocelulosa y tipo de fibra. La densidad representada corresponde a la observada, por lo que los valores obtenidos no son reales, lo óptimo sería utilizar el ensayo de porosimetría de intrusión de mercurio, ya que este método nos permite visualizar que tipo de poro posee el geopolímero y cómo cambia con respecto a la nanocelulosa en su interior. Al revisar bibliografías pertinentes se puede comprobar que al agregar nanocelulosa se reduce notablemente los poros de la matriz del geopolímero, con una buena unión y sin ninguna degradación notable, por otra parte, la densidad del geopolímero debe aumentar conforme aumenta el porcentaje de nanocelulosa en su interior. Sin embargo, al obtener una densidad observable se evidencia que la densidad no cambia significativamente con respecto al aumento

de nanocelulosa, este método presenta un error sistemático, ya que se midió manualmente con un calibrador Vernier cada cara del cubo (Chen et al., 2022; Rocha Ferreira et al., 2021).

### 3.2 FTI Espectroscopia IR de nanocristales de celulosa y geopolímeros compuestos

**Tabla 3.1**

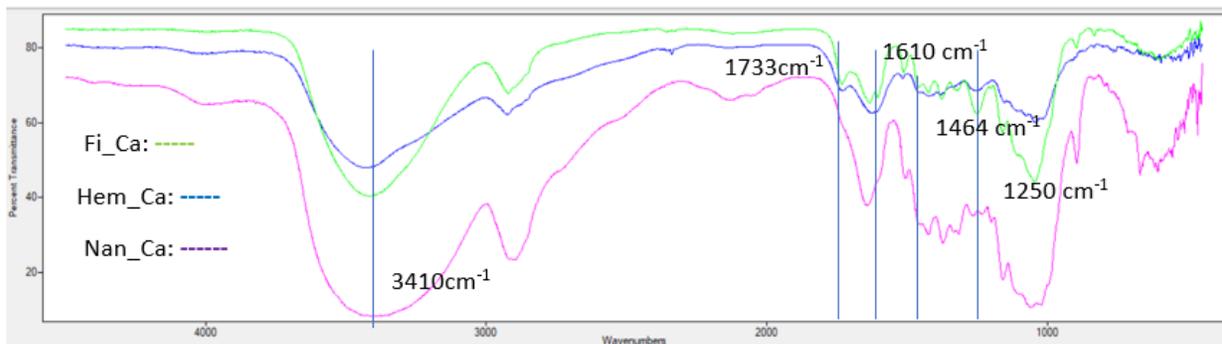
*Nomenclatura de las muestras analizadas*

Código	Tipo de fibra	Componente
Fi_Co	coco	Fibra natural
Hem_Co	coco	Hemicelulosa
Nan_Co	coco	Nanocelulosa
Fi_Ca	caña	Fibra natural
Hem_Ca	caña	Hemicelulosa
Nan_Ca	caña	Nanocelulosa
G_0	-	Geopolímero
Gca	-	Geopolímero con nanocelulosa de caña
Gco	-	Geopolímero con nanocelulosa de coco

#### 3.2.1 Bagazo de caña de azúcar

**Figura 3.3**

*FTIR Caña de azúcar*



En la figura 3.3, el pico  $1733\text{cm}^{-1}$  del espectro FC se le atribuye al estiramiento C=O, su longitud disminuyó en los espectros Fi\_ca y Hem\_Ca , indicando que la hemicelulosa y la lignina fue degradada completamente en la hidrolisis acida con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

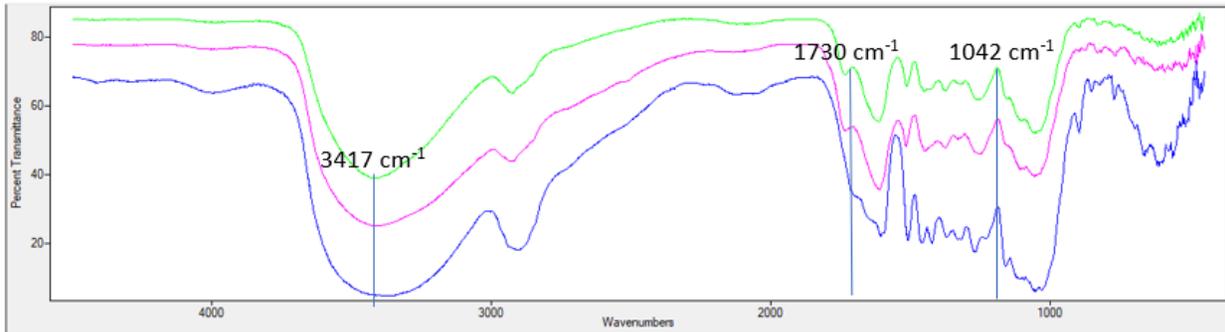
Del mismo, los picos  $1610, 1464$  y  $1250\text{ cm}^{-1}$  se le atribuye al estiramiento C=C, enlaces  $\text{CH}_3$  y estiramiento C-O presente en la lignina y la hemicelulosa, a partir del tratamiento alcalino e hidrolisis acida las longitudes longitud fue disminuyendo con respecto al espectro Nan\_Ca. El pico ubicado a  $1050\text{ cm}^{-1}$  está asociado con la vibración esquelética del anillo de piranosa C–O–C y la intensidad de este pico se incrementó gradualmente en el espectro Nan\_Ca, donde la mayor intensidad se registró para la de celulosa. Estos resultados indican que la estructura de la celulosa permaneció intacta y no fue eliminada por los tratamientos químicos.

### **3.2.2 Fibra de coco**

Tanto como la fibra de coco y los componentes lignocelulósicos se analizó mediante FTIR, los espectros IR de la fibra, lignina, hemicelulosa y nanocelulosa de coco se muestran en la figura 3.4. Aunque mostraron diferentes estructuras IR, los 4 componentes consisten en su mayoría en alqueno, compuestos aromáticos, ésteres, cetonas y alcoholes. Se evidencia que la vibración en  $1730\text{ cm}^{-1}$  desaparece por completo en Nan\_Co y que está fuertemente presente en Hem\_Co, esto indica que el tratamiento alcalino que se utilizó para separar la lignina de la celulosa removió por completo el grupo carbonilo distintivo de la hemicelulosa.

### **Figura 3.4**

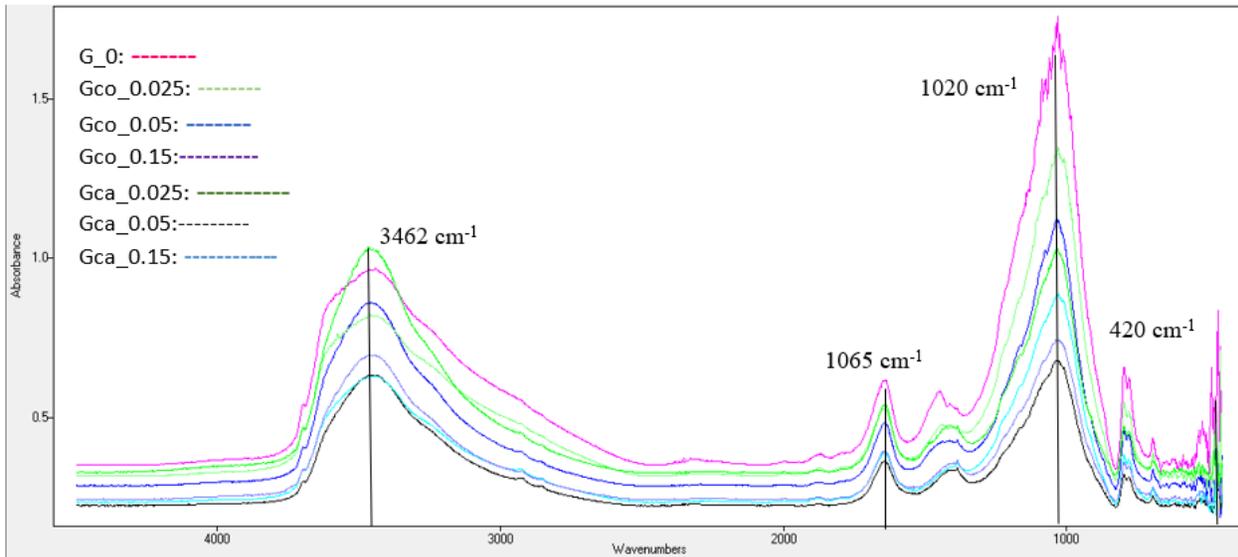
*FTIR Fibras de coco*



### 3.2.3 FTIR Geopolímero y Geopolimeros compuestos

Figura 3.5

FTIR Geopolimeros



Los espectros FTIR de los geopolímeros compuestos con nanocelulosa se muestra en la figura 3.5. A los límites de 3462  $\text{cm}^{-1}$  y 1655  $\text{cm}^{-1}$  las bandas anchas de vibración demuestran los espectros correspondientes al estiramiento y la flexión de O-H. La intensidad de picos en 420  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones de flexión Si-O-Si. Otra banda muy marcada se estableció en 1020  $\text{cm}^{-1}$  lo cual indica la presencia de vibraciones por parte de Si-O-Al y Si-O-Si de los geopolímeros. Sin embargo, no se evidencia vibraciones de estiramiento, flexiones o

deformaciones con respecto a la nanocelulosa presente en el geopolímero, esto se fundamenta en que los porcentajes utilizados fueron extremadamente bajos y simplemente los grupos funcionales no se pudieron apreciar debidamente (Ulloa et al., 2018).

### 3.3 Difracción de rayos X de la materia prima y de geopolímeros compuestos

Los porcentajes de las fases cristalinas en la tabla corresponde a los Difractograma de la Zeolita y de los Geopolímeros obtenidos a partir del método de refinamiento de Rietveld, sus respectivas figuras se encuentran en el Anexo A(AnexoA1-AnexoA8).

**Tabla 3.2**

*Información mineralógica de materia prima y sus correspondiente geopolímeros*

Fase Cristalina	Porcentajes							
	Zeolita	Blanco	Caña			Coco		
			0,025	0,05	0,15	0,025	0,05	0,15
Mordenita	21,7	16,6	14,2	16,7	15	15,8	16,3	16,2
Cuarzo	20,4	15,1	12,4	14,4	14,4	16,1	14,6	14,3
Albita	7	4,2	4,6	6,1	6,7	4,8	5,3	6,9
Amorfos	50,9	64,1	68,7	62,8	63,9	63,3	63,9	62,2

Como se observa en la tabla, los porcentajes de las fases cristalinas de los geopolímeros compuestos fueron disminuyendo con respecto a los porcentajes las fases cristalinas de la zeolita. El contenido de mordenita y cuarzo se consumió como fuentes de aluminosilicatos para la reacción de geopolimerización convirtiéndose en contenido amorfo. El porcentaje del contenido amorfo de los geopolímeros compuestos no se mantuvo constante, en los geopolímeros con nanocelulosa de caña, se observó que para Gca\_0.025 el contenido amorfo es de 68.7% y para Gca\_0.05 es de 62.8% , esta variación de porcentaje posiblemente se deba a que no hubo una correcta dispersión de la nanocelulosa en los geopolímeros, otro posible factor que influyo en

esta variación es el tiempo de curado que tuvieron las muestras, o también el tiempo que se tomó para analizar las muestras en el difractómetro después de la prueba de compresión. Del mismo modo, para los geopolímeros con nanocelulosa de coco la variación del porcentaje del contenido amorfo se da en Gco\_0.15, disminuyendo de 63.9% a un 62.2%. En cambio, las muestras de Gco\_0.025 y Cco\_0.05, no se vieron afectadas por algún factor externo dado que el contenido amorfo aumenta al incrementar el contenido de nanocelulosa de coco (Ulloa et al., 2018).

### 3.4 Estabilidad térmica de geopolímeros con y sin reforzamiento

En el anexo B, muestra los termogramas TGA de los geopolímeros compuestos a 28 días de edad. Puede verse que los análisis de las muestras tuvieron tendencias características similares hasta 1000°C. Todos los geopolímeros perdió un porcentaje de peso significativo hasta una temperatura de 150°C. La primera etapa ocurrió dentro del rango de temperatura de 25°C-100°C, hay una pérdida significativa de masa debido a la porosidad del material, lo que se evidencia en una pérdida más significativa de agua superficial.

**Tabla 3.3**

Pérdida de masa de geopolímeros con respecto a la temperatura

Geopolímeros Códigos	Pérdida de masa (%)						Total %
	25-100°C	100-200°C	200-400°C	400-600°C	600-850°C	850-1000°C	
G_0	5,292	3,146	2,314	0,8164	0,6096	0,0285	12,21
Gco_0,025	5,292	3,146	2,314	0,8164	0,6096	0,0285	12,21
Gco_0.05	3,897	3,33	2,387	1,182	0,5012	0,03595	11,26
Gco_0.15	4,59	3,105	2,147	0,9073	0,1726	0,007164	10,91
GCa_0.025	5,498	3,193	2,311	0,9524	0,5236	0,03056	12,45
Gca_0.05	4,784	3,146	2,33	0,9367	0,4622	0,01417	11,64
Gca_0.15	5,487	3,197	2,78	0,8682	0,03079	0,01632	12,29

Las muestras presentaron patrones similares; la pérdida de masa en el rango de 100 a 200 °C se atribuye a la pérdida del agua intermolecular y cristalina que existe en la estructura del geopolímero. Además, entre 200 a 400 °C la celulosa presenta una gran pérdida de peso, no obstante, el geopolímero protege a la nanocelulosa de la degradación térmica, posiblemente actuando como barrera para reducir la entrada de aire y la degradación oxidativa resultante (Alzeer & MacKenzie, 2013).

Estos resultados muestran que a pesar de la formación de microfisuras en la matriz del geopolímero por el calentamiento, las fibras están protegidas hasta los 400 °C por la matriz geopolimérica, lo que indica su uso como material de construcción resistente al fuego (Alzeer & MacKenzie, 2013). Se observa una pérdida adicional de masa entre 300–600°C, que se atribuye a la deshidroxilación de los grupos Al-OH y Si-OH en la estructura del geopolímero. Entre 600°C a 850°C puede atribuirse a la descarbonatación de posibles subproductos potenciales como  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Auqui et al., 2017).

En base a la microestructura del producto, se puede especular que el geopolímero y la nanocelulosa están bien unidos y envueltos firmemente entre sí, lo que ralentizaba la velocidad de dispersión del agua unida (Zheng et al., 2023). La mayor parte del agua en los geopolímeros se evapora a 100 °C, mientras que el agua restante se evapora en el intervalo de 100 a 200 °C. La pérdida de peso adicional está por encima de los 600 °C, probablemente a la liberación de iones hidroxilo y a los enlaces de sialato.

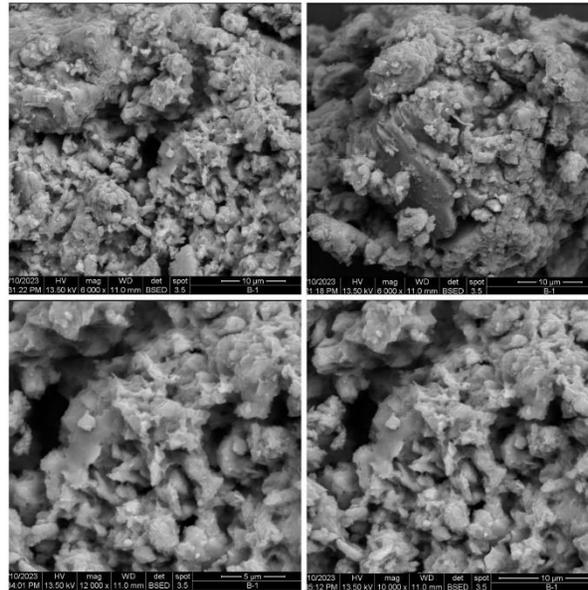
### **3.5 Micrografías SEM de la matriz de geopolímero**

En la Figura 3.5 – Figura 3.7 muestran la micrografía de los geopolímeros con y sin reforzamiento, en estas se puede observar una microestructura similar a una esponja con nanoporos, la cual presenta una superficie muy densa e irregular. También, se puede observar algunas fases cristalinas que se pueden atribuir a la zeolita sin reaccionar dentro de la matriz del

geopolímero y posibles carbonatos como el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  formados debido a la reacción entre los activadores alcalinos y el  $\text{CO}_2$  durante el tiempo de curado (Rahmawati et al., 2022).

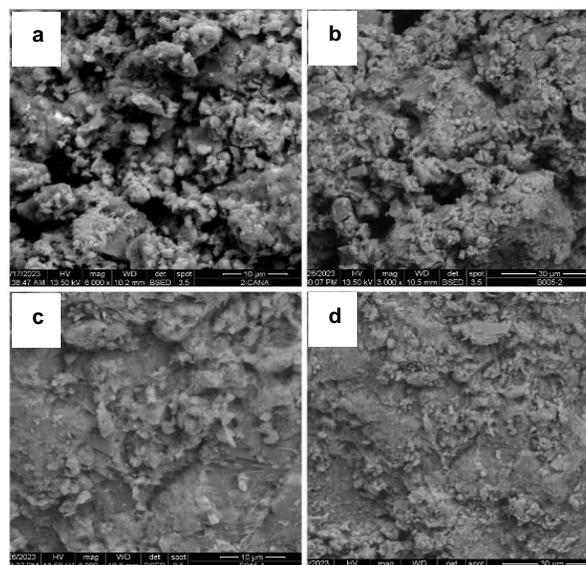
**Figura 3.6**

*Micrografías SEM de la matriz de geopolímero sin reforzamiento*



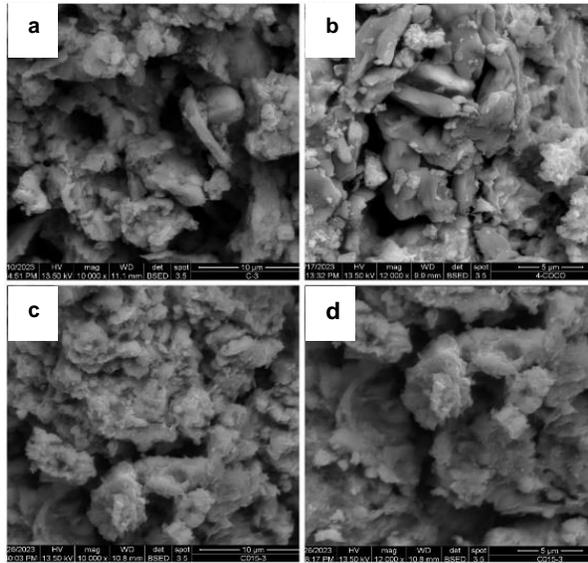
**Figura 3.7**

*Micrografías SEM de la matriz de geopolímero con reforzamiento: a)0.025, b)0.05, c)0.15, d)0.15 % nanocelulosa de caña*



**Figura 3.8**

*Micrografías SEM de la matriz de geopolímero con reforzamiento: a)0.025, b)0.05, c)0.15, d)0.15 % nanocelulosa de coco*



Al comparar esta figura, se observa que a medida que aumenta el contenido de nanocelulosa se aprecian menos vacíos en la matriz geopolimérica. Esto es debido a que ralentizan la propagación de microfisuras del material compuestos y aumentan la resistencia a la compresión. La tenacidad a la fractura del material compuesto es significativamente mayor que la del polímero puro (Lv et al., 2022; Pascual et al., 2022).

### **3.6 Análisis económico**

#### **3.6.1 Cálculos de costos en Capcost**

En la experimentación se realizaron cálculos de reactivos para 660 g de geopolímeros, el cual será nuestra base de cálculo para el análisis económico que se lo realiza entorno a una producción diaria de 250 bloques de geopolímeros Tabla 3.4. Al tener una comparativa con el

mercado de bloques de cemento, se efectúa las dimensiones y el peso de cada bloque de geopolímero con las del bloque de cemento de construcción el cual consta de un peso de 8,5 kg y medidas de 20X40X10 cm.

**Tabla 3.4**

*Análisis del cálculo de costos en Capcost*

<b>Materiales</b>	<b>SOLUCION NECESARIA PARA UN PRIMA (g)</b>	<b>SOLUCION NECESARIA PARA UN BLOQUE (g)</b>	<b>SOLUCION NECESARIA PARA PRODUCCION DIARIA (kg)</b>
<b>0.025</b>			
<b>SOLUCION NAOH 10M</b>	52.78	679.73	169.9322089
<b>SILICATO DE SODIO</b>	178.15	2294.36	573.5898472
<b>NANOCELULOSA</b>	0.07	0.91	0.227943942
<b>Zeolita</b>	660	8500	8.5
<b>0.05</b>			
<b>SOLUCION NAOH 10M</b>	52.76	679.52	169.8801441
<b>SILICATO DE SODIO</b>	178.1	2293.66	573.4141077
<b>NANOCELULOSA</b>	0.14	1.82	0.455748207
<b>Zeolita</b>	660	8500	8.5
<b>0.15</b>			
<b>SOLUCION NAOH 10M</b>	52.7	678.69	169.6722038
<b>SILICATO DE SODIO</b>	177.88	2290.85	572.7122251
<b>NANOCELULOSA</b>	0.42	5.46	1.365571057
<b>Zeolita</b>	660	8500	8.5

Fuente: Capcost

### **3.6.2 Selección del geopolímero con reforzamiento más eficiente**

Se realizó el análisis económico con respecto a la utilización de los materiales y reactivos tanto para la fabricación del geopolímero como para la nanocelulosa, al hablar de un único producto que es el geopolímero con reforzamiento, todos los reactivos a utilizar son los mismos

sin embargo la diferencia radica en el porcentaje de nanocelulosa que se utilizará como reforzamiento y es que al variar esta proporción, la cantidad de materia prima varía, como se muestra en la tabla 3.5 y tabla 3.6, que corresponde a los flujos en kg/h de los materiales a utilizar en la producción de 250 bloques de geopolímeros diarios. Un dato importante es que el análisis se efectuó para cada porcentaje de nanocelulosa en el geopolímero, es decir que para cada tipo de geopolímero se asumió una producción de 250 bloques diarios, de esta forma se evidencia cual producción es más factible, ya que nos permite ver cuál es la ganancia, el ROI y los años en que se recupera la inversión y como se diferencian unos de otro.

Entonces se evidencia que la producción de geopolímeros utilizando bagazo de caña como reforzamiento es más eficiente que la producción con cáscara de coco, ya que los costos de producción son menores lo que da como resultado una mayor ganancia. La razón fundamental es que bagazo de caña y cáscara de coco tienen composiciones diferentes de compuestos lignocelulósicos. El bagazo de caña posee 0,107 % en peso de lignina, mientras que la cascara de coco posee 0.307 %, evidentemente se necesitará mucho más NaOH para el tratamiento alcalino de la cáscara de coco, por lo que da como resultad que la producción de nanocelulosa de fibra de coco sea más cara.

**Tabla 3.5**

*Flujos y Ganancia con respecto al porcentaje de nanocelulosa de caña*

Nanocelulosa de caña	
Porcentaje de nanocelulosa en geopolímero	
0.025%	
Materia prima	kg/h
Zeolita	265.63
H2O	158.270749
NaOH	23.1360171

H2SO4		2.279439422
BAGAZO DE CAÑA		0.44004622
SILICATO DE SODIO		573.5898472
NANOCELULOSA		0.227943942
GANANCIA	\$	1,930,367.79
0.050%		
Zeolita		265.63
H2O		166.5083403
NaOH		26.31388707
H2SO4		4.557482069
BAGAZO DE CAÑA		0.879822793
SILICATO DE SODIO		573.4141077
NANOCELULOSA		0.455748207
GANANCIA	\$	1,882,168.43
0.15%		
Zeolita		265.63
H2O		199.4057057
NaOH		39.00591775
H2SO4		8.87575
BAGAZO DE CAÑA		2.636100386
SILICATO DE SODIO		572.7122251
NANOCELULOSA		1.365571057
GANANCIA	\$	1,769,129.04

**Tabla 3.6**

*Flujos y Ganancia con respecto al porcentaje de nanocelulosa de coco*

Nanocelulosa de coco	
Porcentaje de nanocelulosa en geopolímero	
0.025%	
Materia prima	kg/h
Zeolita	265.63
H2O	159.0290571
NaOH	23.87356201
H2SO4	2.279439422

FIBRA DE COCO	0.44433517
SILICATO DE SODIO	573.5898472
NANOCELULOSA	0.227943942
GANANCIA	\$ 1,927,791.72
<b>0.050%</b>	
Zeolita	265.63
H2O	168.0244917
NaOH	27.78852495
H2SO4	4.557482069
FIBRA DE COCO	0.888398064
SILICATO DE SODIO	573.4141077
NANOCELULOSA	0.455748207
GANANCIA	\$ 1,877,209.93
<b>0.15%</b>	
Zeolita	265.63
H2O	203.9511764
NaOH	43.42441635
H2SO4	13.65571057
FIBRA DE COCO	2.661931885
SILICATO DE SODIO	572.7122251
NANOCELULOSA	1.365571057
GANANCIA	\$ 1,674,666.44

Una vez planteada cual fibra es más económica fabricar, se debe elegir cual proporción o porcentaje es el más óptimo, para esto se debe valorar las propiedades mecánicas de los geopolímeros. Se evidencia en la figura 3.1 que la fuerza de compresión más alta se encuentra en Gca\_0.025 y Gca\_0.15, donde ambas poseen una fuerza de compresión cercana a 6 MPa. Entonces se toma como mejor opción el Gca\_0.025 ya que se requiere menos cantidad de reactivos y por ende menos inversión.

### 3.6.3 Análisis de costos del geopolímero con 0.025 de nanocelulosa de caña

**Tabla 3.7**

*Información Económica de la planta*

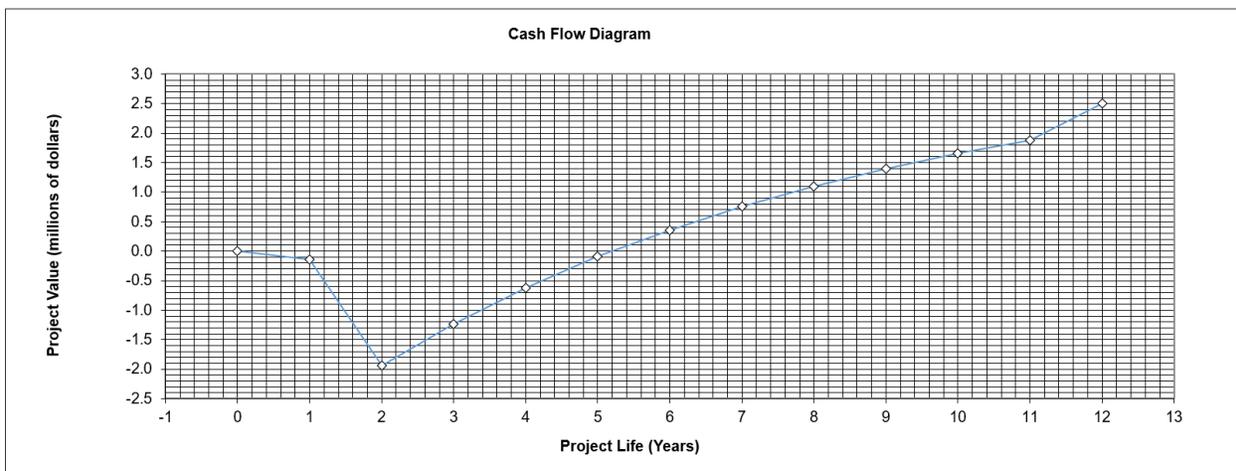
Información Económica	Valor
Costo de la tierra	\$2,000,000.00
Valor Actual Neto (millones)	2.50E+06
Tasa Interna de Retorno	26,82%
Capital de trabajo	\$275.000,00
Tasa de Interés Anual	15%
Tasa de impuesto	20%
Costo de mano de obra	\$2.400,00
Numero de Operarios	5
Salario	\$480.00
Años para recuperar inversión	5

Fuente: Capcost

En la tabla 3.7 se puede observar que el capital invertido fue de \$275000 y el costo del lugar donde se desarrollará la planta es de \$2000000. Esta inversión también se ve reflejada en la Figura 3.7, en los dos primeros años, la figura decrece debido a la inversión inicial y construcción de la planta. Sin embargo, en el tercer año se comenzará a generar ganancias por la venta del producto y alcanzando los 6 años se recuperan el dinero invertido.

**Figura 3.9**

*Diagrama de flujo de Efectivo*



Fuente: CapCost

La planta trabajará con una tasa de interés anual y una tasa de impuesto del 15 y 20%, dado que son valores cercanos a los porcentajes que se rigen en el Ecuador. Además, el valor de mano de obra se lo considero con un costo de 2400 dólares mensuales por los 5 operadores que trabajaran en la planta. La planta operara 8 horas y utilizara energía eléctrica para la elaboración de los bloques de geopolímero reforzado. Como se observa en la tabla 3.7, el indicador TIR (Tasa interna de retorno) que indica el porcentaje de inversión en la compra de materia prima, obtuvo un valor de 26.82%. Por otra parte, el indicador VAN (Valor actual neto) fue de \$ 2.50 millones indicando las ganancias después de la inversión. Con estos valores muestran que la planta es rentable y ejecutable.

## CAPÍTULO 4

### 4 Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1 Conclusiones

El reforzamiento de geopolímero con nanocelulosa muestra una respuesta favorable y viable, ya que las propiedades mecánicas, físicas y químicas mejoraron significativamente con respecto a un geopolímero sin reforzamiento. Las propiedades mecánicas de los geopolímeros se las midieron mediante la fuerza de compresión y análisis termogravimétrico, el cual se evidencia que la fuerza de compresión aumentó de manera considerable para los geopolímeros con reforzamiento de nanocelulosa independiente de la biomasa utilizada; mientras que en la prueba de TGA se aprecia que el reforzamiento con nanocelulosa tiene una buena respuesta a altas temperaturas y es que la nanocelulosa actúa como una barrera dentro del geopolímero, que no permite la degradación total del material

Se sometió a la fuerza de compresión todos los geopolímeros con sus respectivos porcentajes de nanocelulosa en el interior, obteniendo resultados favorables con respecto a la nanocelulosa como reforzamiento. Al comparar los resultados de G\_0 con los de Gco\_0.025, Gco\_0.05, Gca\_0.025 y Gca\_0,05; la fuerza de compresión aumentó considerablemente ya que la nanocelulosa se acopla perfectamente dentro de la matriz porosa del geopolímero sin afectar el reordenamiento molecular.

Se logro determinar la composición de cada geopolímero reforzado con nanocelulosa mediante las técnicas de caracterización reportadas en metodología. A partir de los resultados medios QRXD, se observó se produjo un aumento del contenido amorfo, producido por la reacción de geopolimerización. Del mismo modo, la técnica TGA, demostró que en el rango de 100-400°C se presenta la mayor pérdida de masa en los geopolímeros reforzados con nanocelulosa, debido a la degradación de las a los nanocristales de celulosa que se encuentran

en la matriz. Con las micrografías obtenidas con el SEM, se observó que medida que incrementa el contenido los nanocristales de celulosa mejoran la microestructura de los geopolímeros, haciendo que la matriz del material sea más compacta y con menos microfisuras mejorando así sus propiedades mecánicas.

Se evidencia que al analizar los costos de producción para cada tipo de geopolímero, el geopolímero reforzado con nanocelulosa de caña al 0.025 % presenta una mejor eficiencia desde el aspecto económico y propiedades mecánicas y físicas, ya que este presenta una fuerza de compresión muy superior al G\_0. Por otra parte, al analizar la demanda de bloques de cemento se logró determinar un costo de producción adecuado para la producción de bloques de geopolímeros reforzados con nanocelulosa, además, se planteó un capital de \$275000 para el desarrollo factible de la planta. Por otra parte, se obtuvo un VAN de \$ 2.50E+06 de ganancia, por lo que aproximadamente en 5 años la planta recuperará todo el dinero invertido. También, hay que tener en cuenta que el costo de producción de geopolímeros es de aproximadamente el doble que los del bloque convencional, posiblemente esto se deba a los precios de los productos detallados ya que se basaron en precios de páginas de internet y no con los proveedores.

A partir del análisis económico se comprobó la sustentabilidad del trabajo, aunque costos de los materiales pueden variar con respecto a la cantidad materia prima se puede tener ganancias en un corto tiempo dado que los geopolímeros compuestos son una potencial alternativa de materiales de construcción. El método empleado también ayuda a no generar mayores gastos dado que el curado de los geopolímeros se los hace a temperatura ambiente y no en la estufa.

## **4.2 Recomendaciones**

La biomasa recolectada debe almacenarse en el horno a una temperatura de hasta de 50 °C para su correcta manipulación, sin que la materia prima sufra alguna descomposición producto de la humedad o carbonización por parte de la temperatura alta dentro del horno.

En la etapa de molienda de la materia prima, se debe ayudar al equipo cortando las fibras con una tijera disminuyendo así el volumen que ocupan las fibras dentro del equipo y a su vez poder colocar más masa sin que el equipo sufra algún daño

En el proceso de armar los morteros de geopolímeros se debe colocar papel film en los moldes de madera, de esta manera se previene que al momento de desmoldar el geopolímero se rompa o pierda su forma ya que puede adherirse a la madera con mayor facilidad en el proceso de curado a 60 °C

Al momento de tratar la biomasa para extraer o separar la hemicelulosa y la lignina de la celulosa, se debe secar bien el precipitado resultante después de cada tratamiento, para cuantificar correctamente la proporción peso-volumen.

## 5 Bibliografía

- Adejumo, I. O., Adebisi, O. A., Adejumo, I. O., & Adebisi, O. A. (2020). Agricultural Solid Wastes: Causes, Effects, and Effective Management. *Strategies of Sustainable Solid Waste Management*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.93601>
- Alzeer, M., & MacKenzie, K. (2013). Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax). *Applied Clay Science*, 75–76, 148–152. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2013.03.010>
- Auqui, N. U., Baykara, H., Rigail, A., Cornejo, M. H., & Villalba, J. L. (2017). An investigation of the effect of migratory type corrosion inhibitor on mechanical properties of zeolite-based novel geopolymers. *Journal of Molecular Structure*, 1146, 814–820. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2017.06.066>
- Bondancia, T. J., Batista, G., de Aguiar, J., Lorevice, M. v., Cruz, A. J. G., Marconcini, J. M., Mattoso, L. H. C., & Farinas, C. S. (2022). Cellulose Nanocrystals from Sugar Cane Bagasse Using Organic and/or Inorganic Acids: Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 10(14), 4660–4676. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00061>
- Burduhos Nergis, D. D., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., & Mohd Tahir, M. F. (2018). Geopolymers and Their Uses: Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012019>
- Chen, S., Ruan, S., Zeng, Q., Liu, Y., Zhang, M., Tian, Y., & Yan, D. (2022). Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review. *Construction and Building Materials*, 328, 127064. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127064>

- Enrique, F., & Carballo, M. (2004). *LAS ZEOLITAS DE LA COSTA DE ECUADOR (GUAYAQUIL): GEOLOGÍA, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES*.
- Jia, D., He, P., Wang, M., & Yan, S. (2020). *Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites*. 311. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9536-3>
- Li, Y., Liu, Y., Chen, W., Wang, Q., Liu, Y., Li, J., & Yu, H. (2016). Facile extraction of cellulose nanocrystals from wood using ethanol and peroxide solvothermal pretreatment followed by ultrasonic nanofibrillation. *Green Chemistry*, 18(4), 1010–1018. <https://doi.org/10.1039/C5GC02576A>
- Lv, C., Liu, J., Guo, G., & Zhang, Y. (2022). The Mechanical Properties of Plant Fiber-Reinforced Geopolymers: A Review. *Polymers 2022, Vol. 14, Page 4134*, 14(19), 4134. <https://doi.org/10.3390/POLYM14194134>
- Majidi, B. (2013). Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. [Http://Dx.Doi.Org/10.1179/175355509X449355](http://Dx.Doi.Org/10.1179/175355509X449355), 24(2), 79–87. <https://doi.org/10.1179/175355509X449355>
- Marakana, P. G., Dey, A., & Saini, B. (2021). Isolation of nanocellulose from lignocellulosic biomass: Synthesis, characterization, modification, and potential applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106606. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.106606>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2019). *PROYECTO DE VIVIENDA CASA PARA TODOS - CPT*.
- Möller, K., & Bein, T. (2013). Mesoporosity – a new dimension for zeolites. *Chemical Society Reviews*, 42(9), 3689–3707. <https://doi.org/10.1039/C3CS35488A>
- Mucsi, G., & Ambrus, M. (2018). *Raw Materials for Geopolymerisation*. <https://doi.org/10.26649/MUSCI.2017.008>

- Okoye, F. N. (2017). Geopolymer binder: A veritable alternative to Portland cement. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5599–5604.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.06.017>
- Owonubi, S. J., Agwuncha, S. C., Malima, N. M., Shombe, G. B., Makhatha, E. M., & Revaprasadu, N. (2021). Non-woody Biomass as Sources of Nanocellulose Particles: A Review of Extraction Procedures. *Frontiers in Energy Research*, 9, 132.  
<https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.608825/BIBTEX>
- Pascual, A. R., Víctor, E. E., Martín, C., Liu, J., & Lv, C. (2022). Durability of Cellulosic-Fiber-Reinforced Geopolymers: A Review. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 796, 27(3), 796. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27030796>
- Rana, A. K., Frollini, E., & Thakur, V. K. (2021). Cellulose nanocrystals: Pretreatments, preparation strategies, and surface functionalization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 1554–1581. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.05.119>
- Rocha Ferreira, S., Ukrainczyk, N., Defáveri do Carmo e Silva, K., Eduardo Silva, L., & Koenders, E. (2021). Effect of microcrystalline cellulose on geopolymer and Portland cement pastes mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 288, 123053. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123053>
- Rynk, R., Schwarz, M., Richard, T. L., Cotton, M., Halbach, T., & Siebert, S. (2022). Compost feedstocks. *The Composting Handbook*, 103–157.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85602-7.00005-4>
- Scarlat, N., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Nita, V. (2015). The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. *Environmental Development*, 15, 3–34. <https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2015.03.006>

- Song, K., Zhu, X., Zhu, W., & Li, X. (2019a). Preparation and characterization of cellulose nanocrystal extracted from *Calotropis procera* biomass. *Bioresources and Bioprocessing*, 6(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/S40643-019-0279-Z/TABLES/3>
- Song, K., Zhu, X., Zhu, W., & Li, X. (2019b). Preparation and characterization of cellulose nanocrystal extracted from *Calotropis procera* biomass. *Bioresources and Bioprocessing*, 6(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/S40643-019-0279-Z/TABLES/3>
- Ulloa, N. A., Baykara, H., Cornejo, M. H., Rigail, A., Paredes, C., & Villalba, J. L. (2018). Application-oriented mix design optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 174, 138–149. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.101>
- Viaggi, D. (2022). Agricultural waste management and valorisation in the context of the circular bioeconomy: Exploring the potential of biomass value webs. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 27, 100356. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2022.100356>
- Wang, H. yuan, Liu, S., Zhai, L. mei, Zhang, J. zong, Ren, T. zhi, Fan, B. quan, & Liu, H. bin. (2015). Preparation and utilization of phosphate biofertilizers using agricultural waste. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(1), 158–167. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60760-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60760-7)
- Westerman, P. W., & Bicudo, J. R. (2005). Management considerations for organic waste use in agriculture. *Bioresource Technology*, 96(2), 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.011>
- Zheng, Y., Wang, Z., Wan, Z., Yang, X., Lin, F., Chen, Y., Tang, L., Lin, G., Lu, Q., Huang, B., & Lu, B. (2023). Mechanochemical fabrication of geopolymer composites based on the reinforcement effect of microfibrillated cellulose. *Ceramics International*, 49(1), 503–511. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2022.09.017>



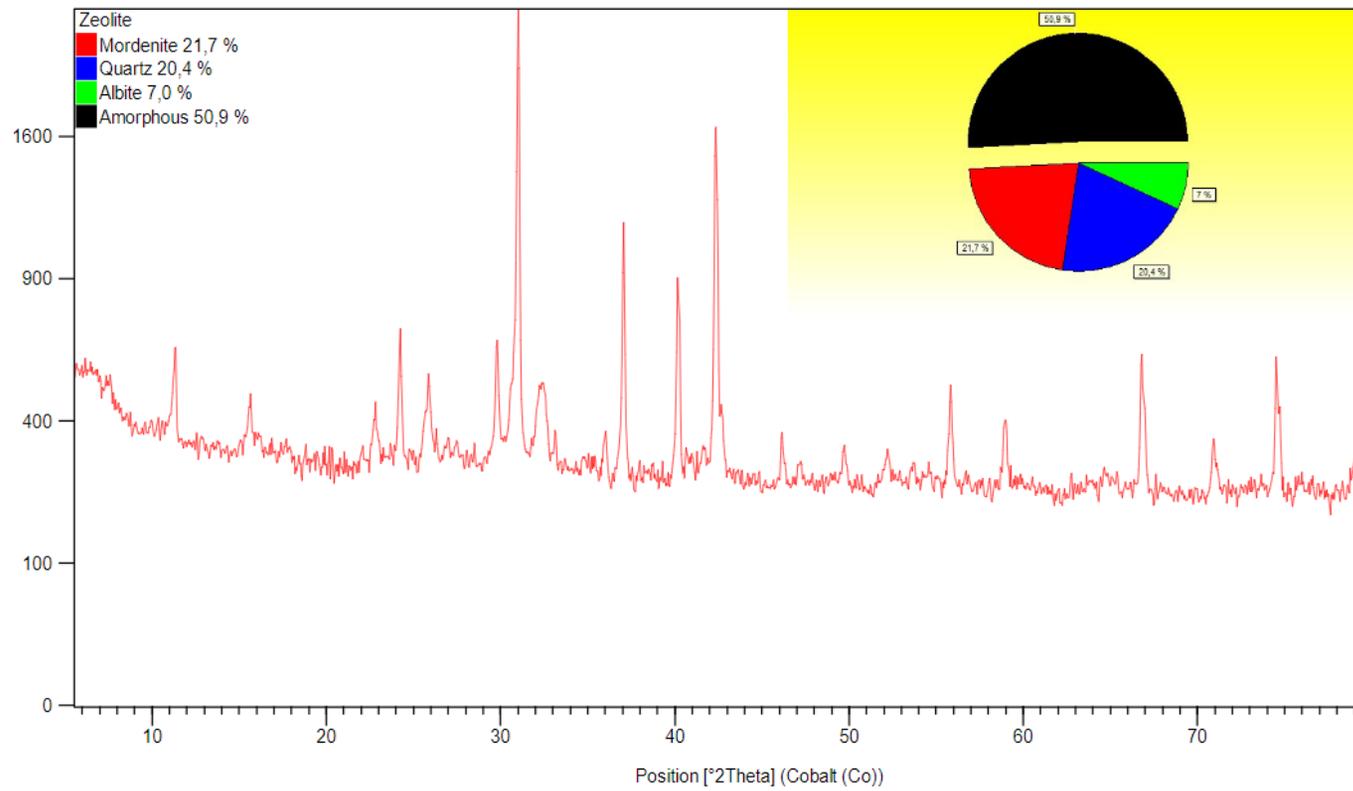
## 6 Anexos

### Anexo A

#### Difracto gramas de materia prima y geopolimeros compuestos

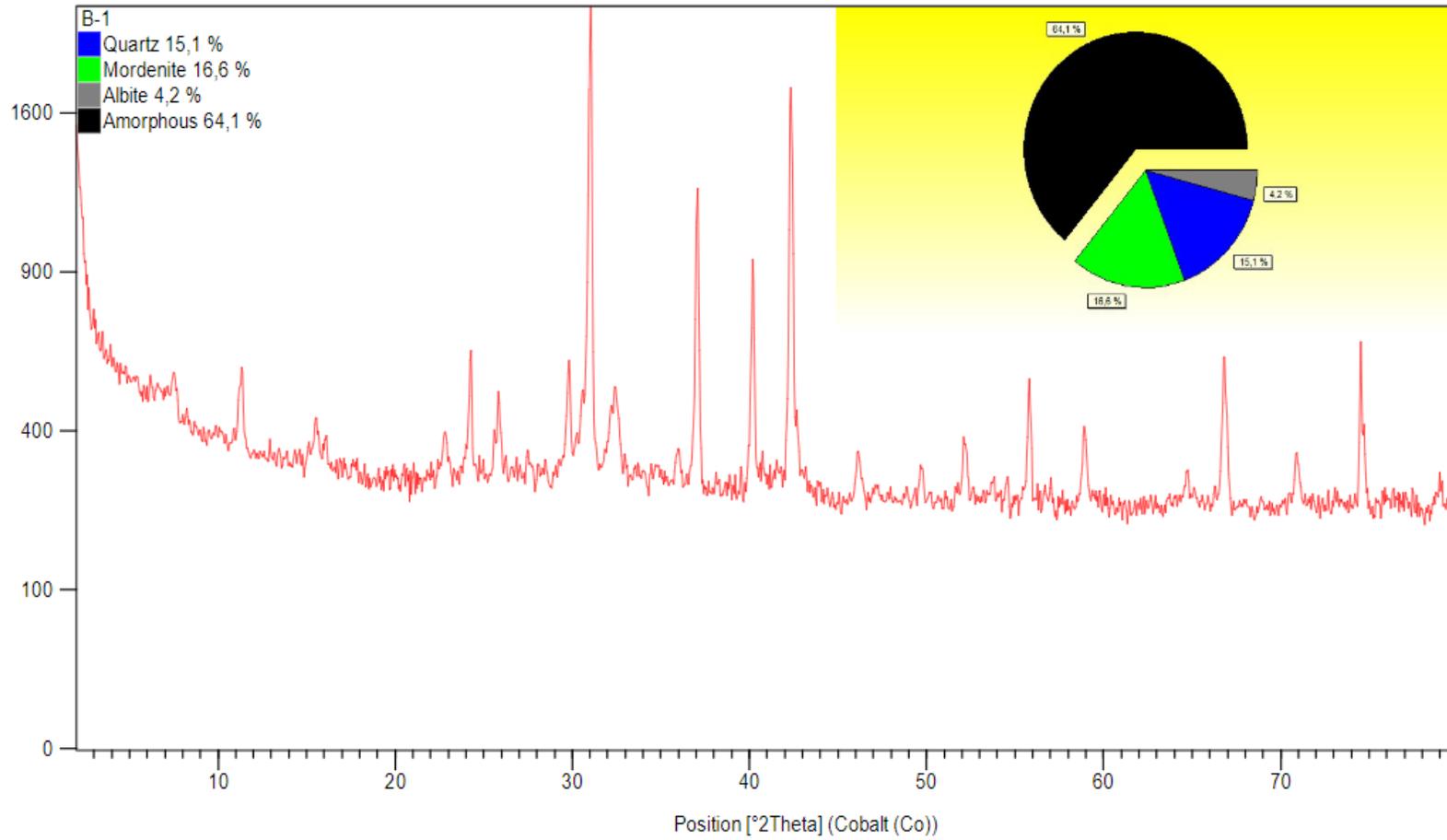
##### Anexo A 1

##### *Difractograma de Zeolita*



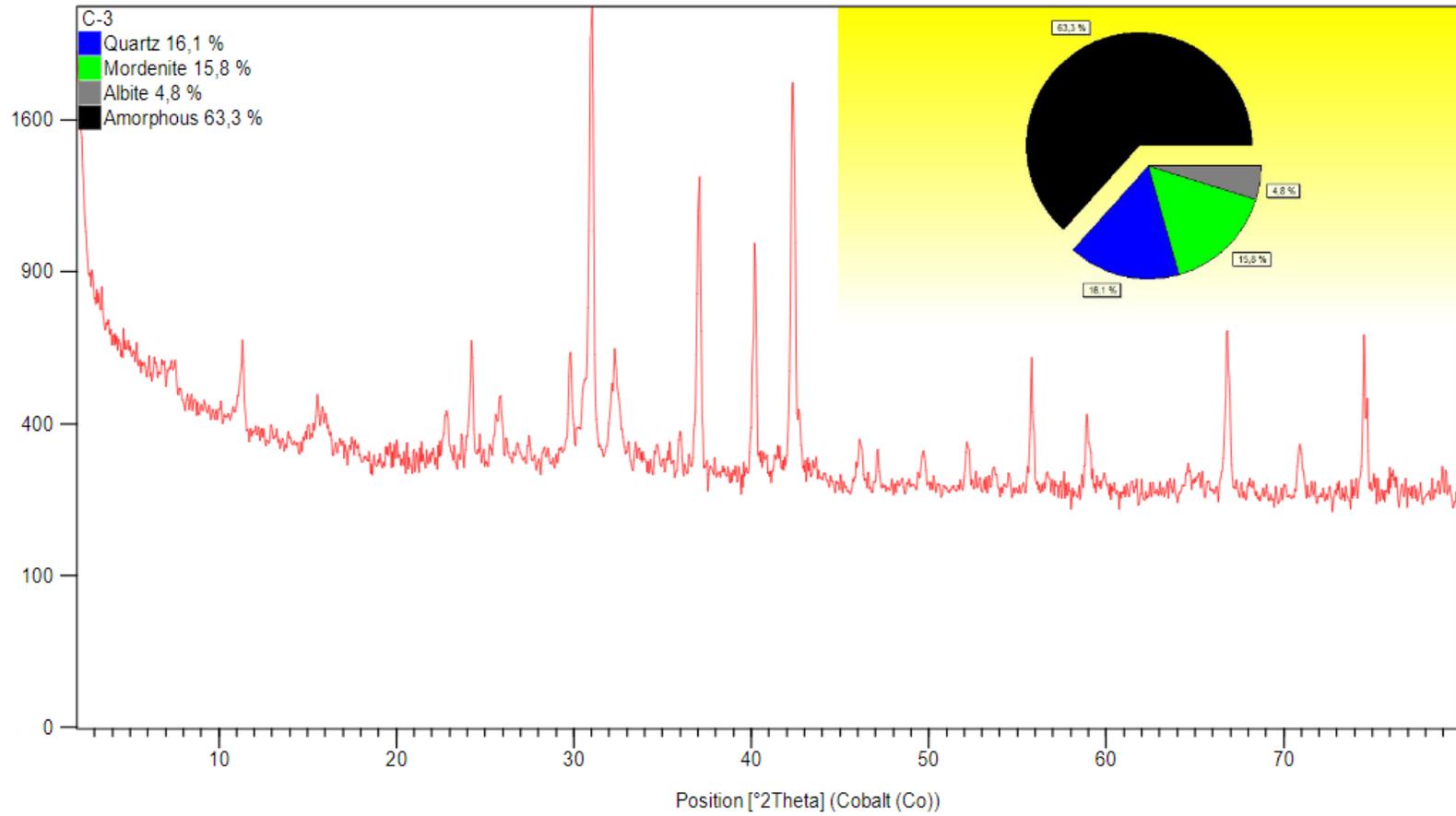
## Anexo A 82

### Difractograma de zeopolímero sin reforzamiento



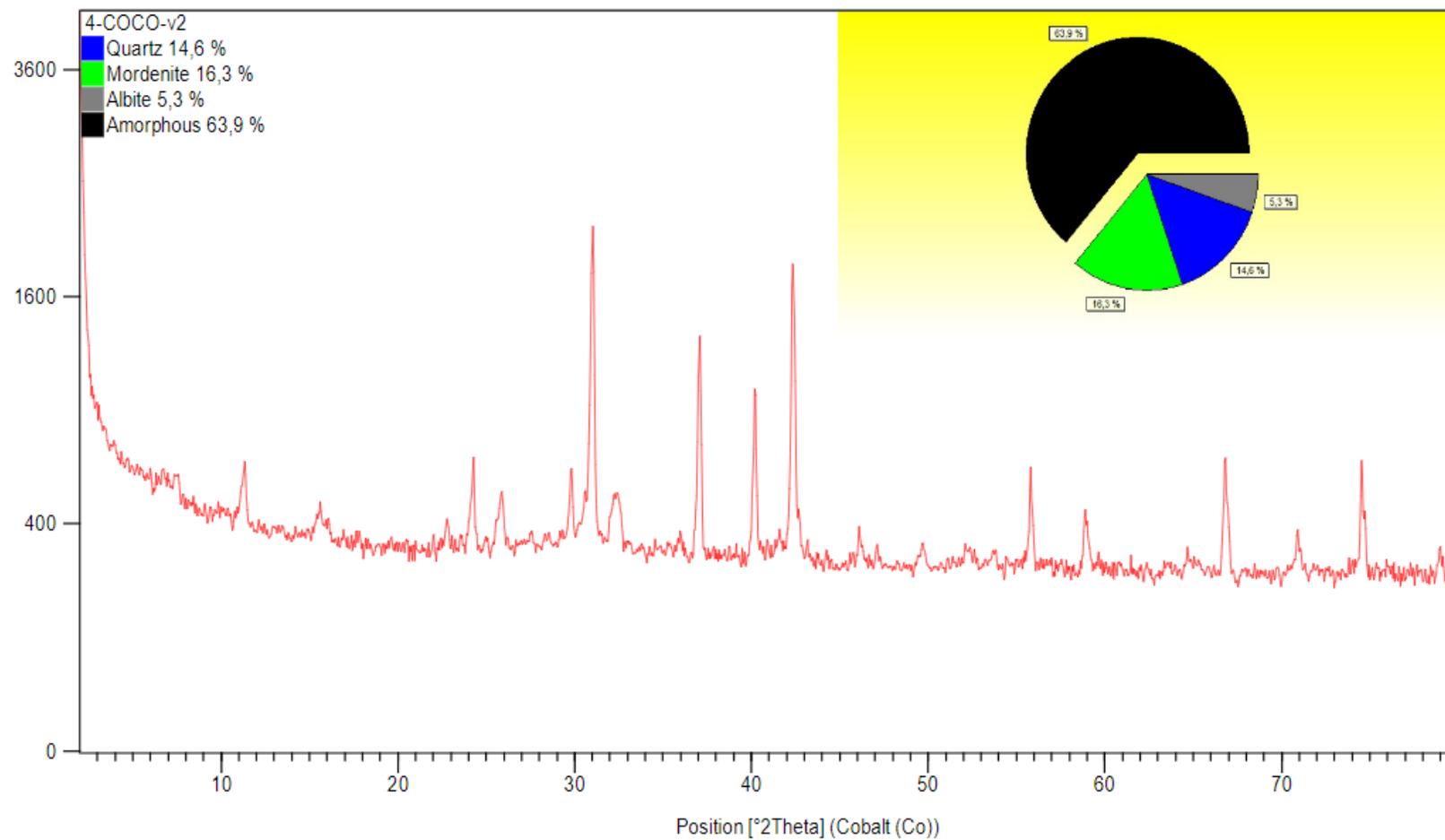
## Anexo A 163

*Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de coco 0.025%)*



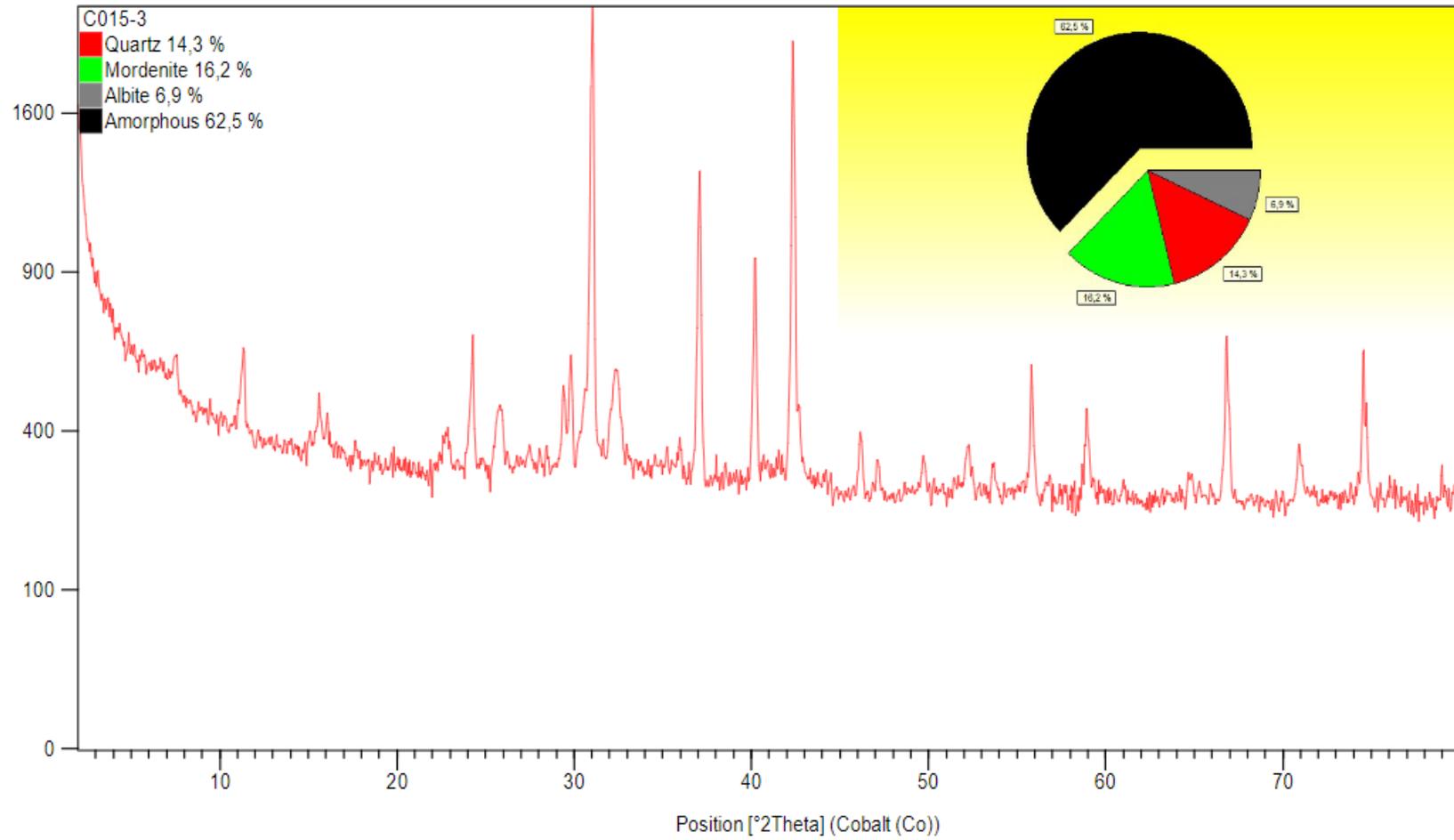
## Anexo A 244

Difractograma de geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de coco 0.05%)



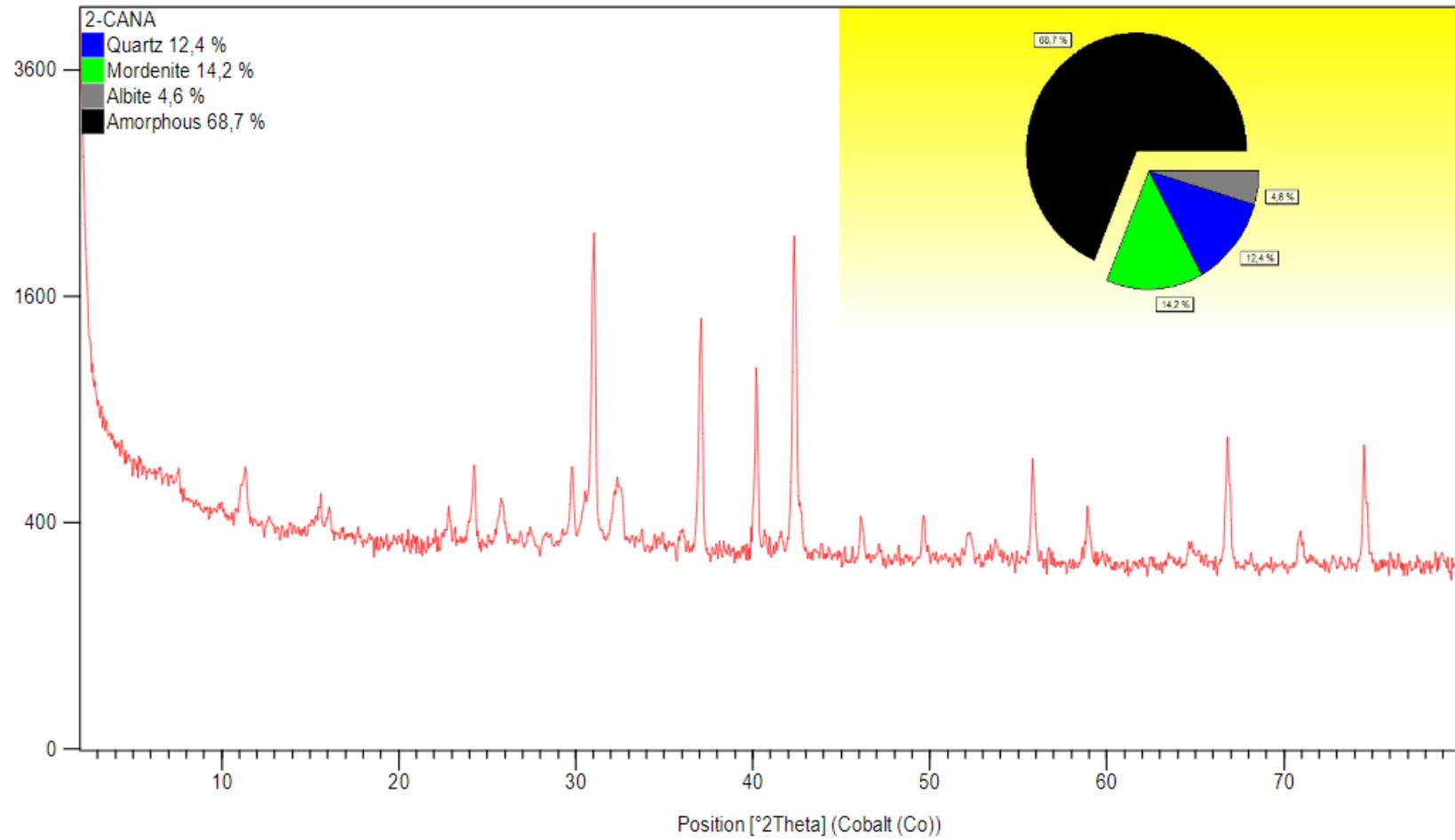
### Anexo A 323

Difractograma de aeopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de coco 0.15%)



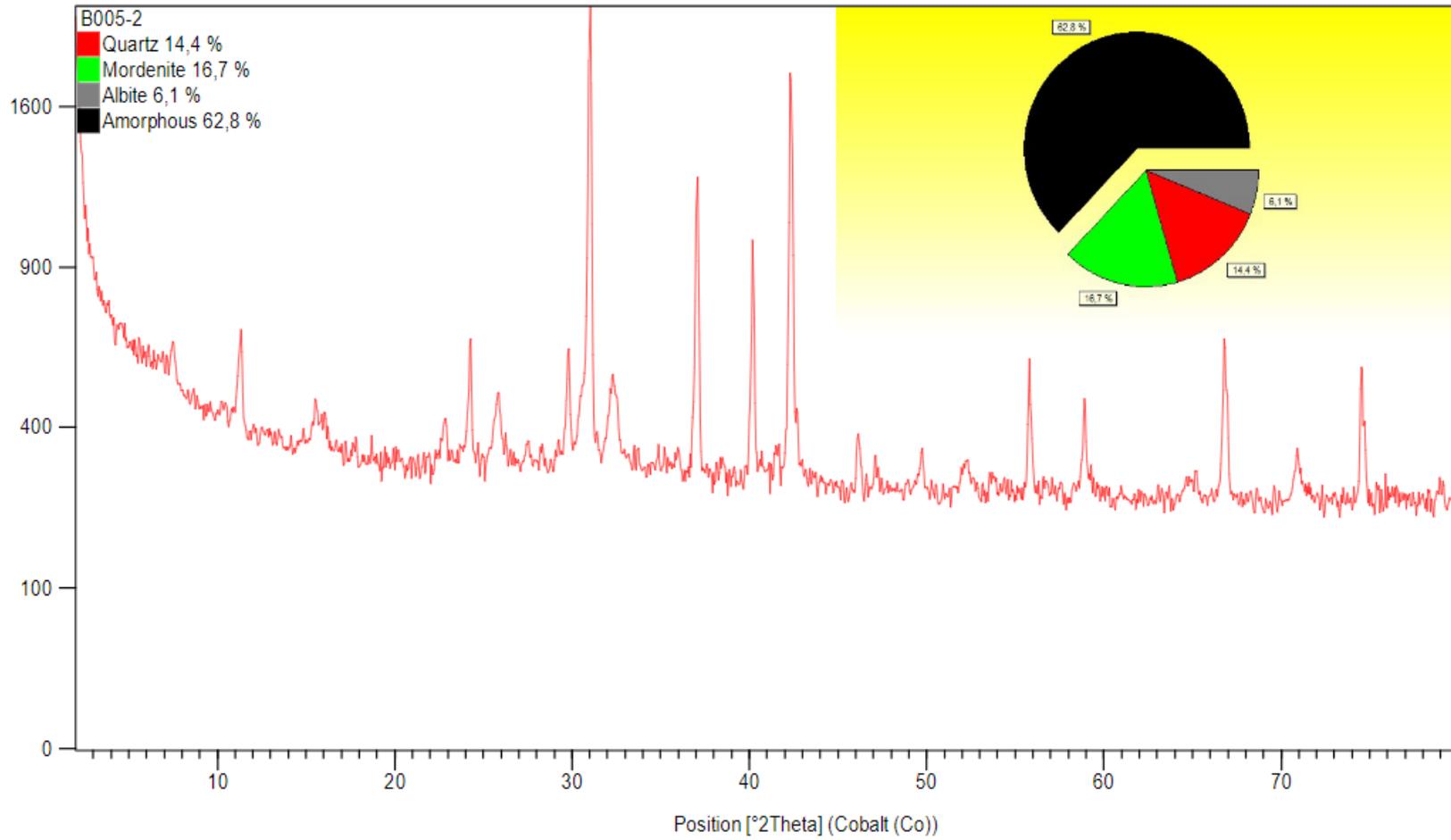
## Anexo A 396

Difractograma de aeopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de caña 0.025%)



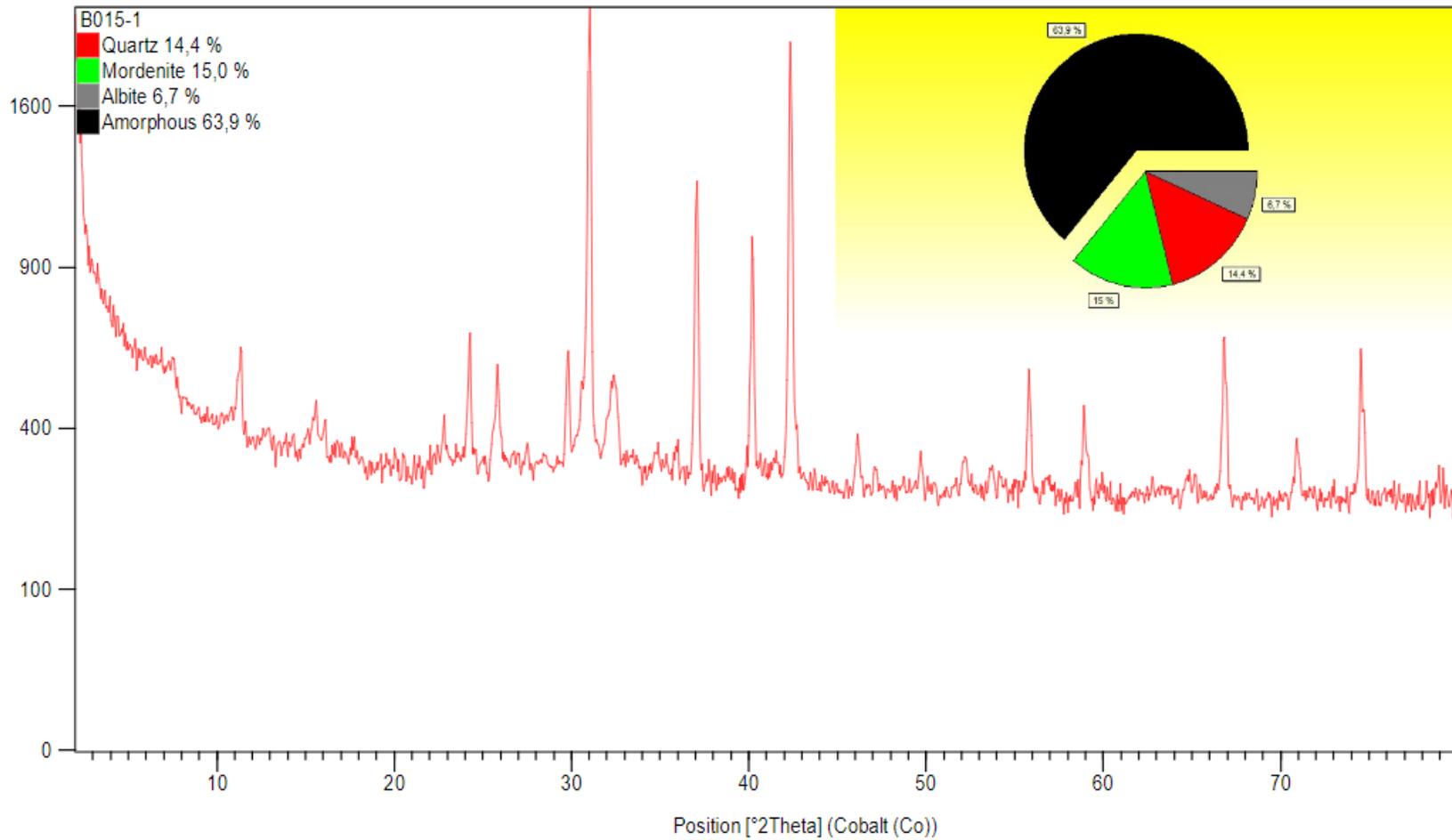
## Anexo A 461

Difractograma de aeopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de caña 0.05%)



## Anexo A 500

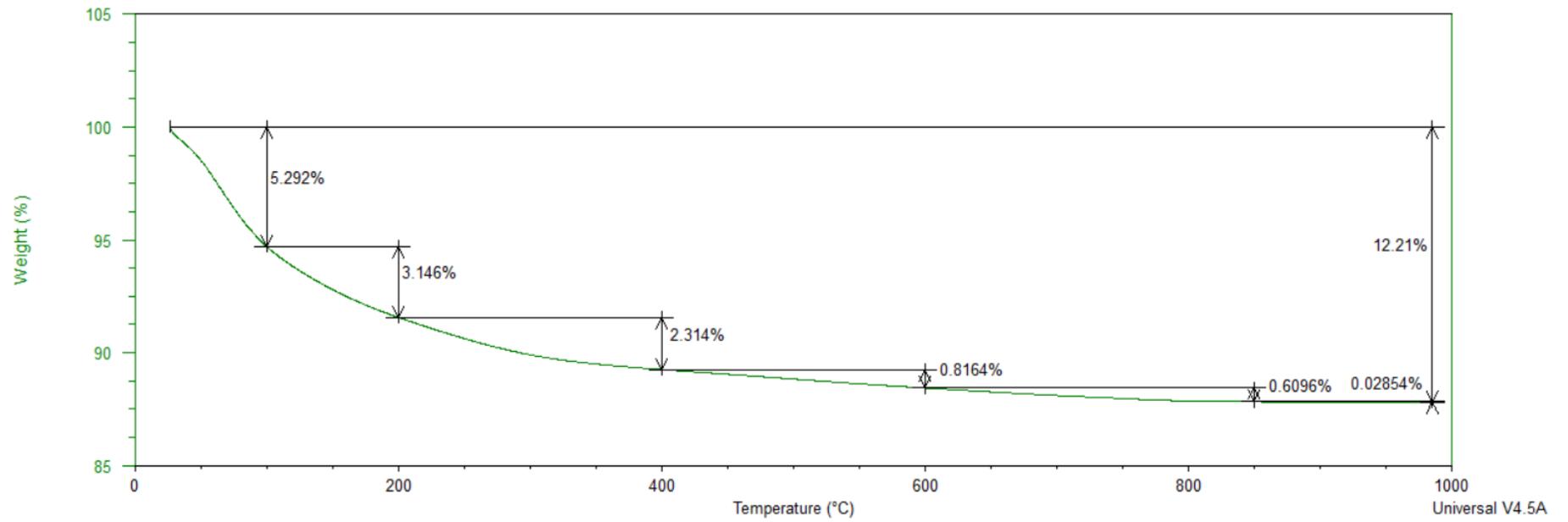
*Difractograma de zeopolímero con reforzamiento (nanocelulosa de caña 0.15%)*



## Anexo B

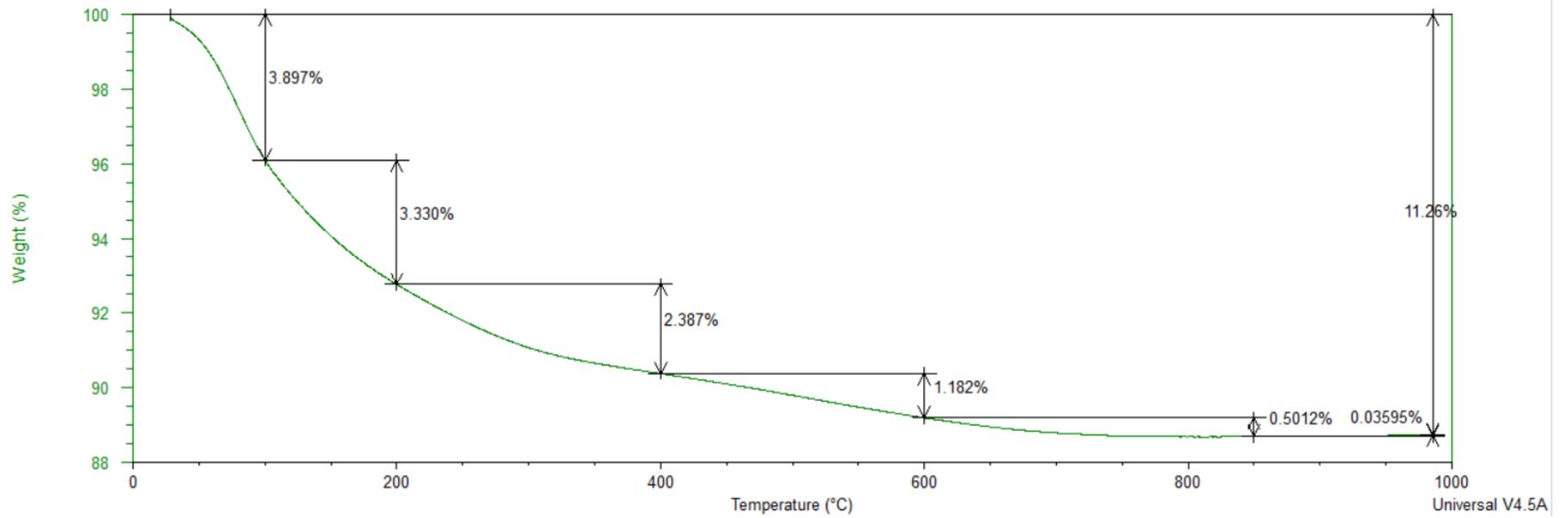
### Análisis termogravimétrico de los geopolímero con reforzamiento

#### Anexo B 1



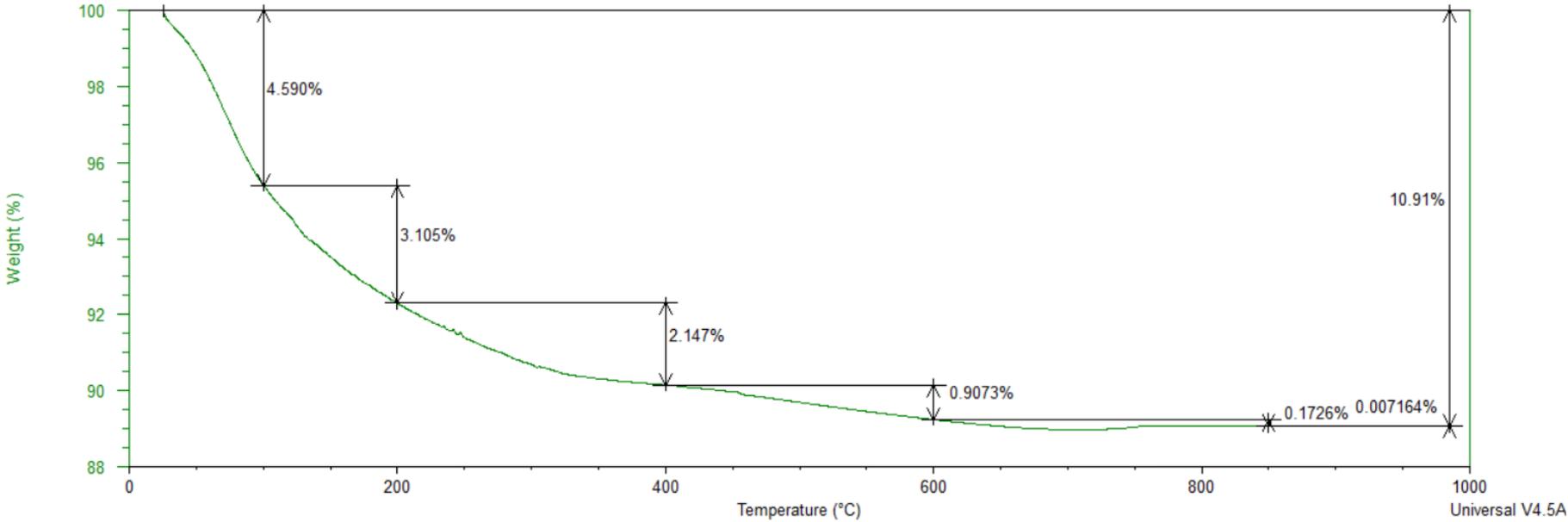
## Anexo B 2

Termoarama Geopolímero con reforzamiento(nanocelulosa coco 0.05)



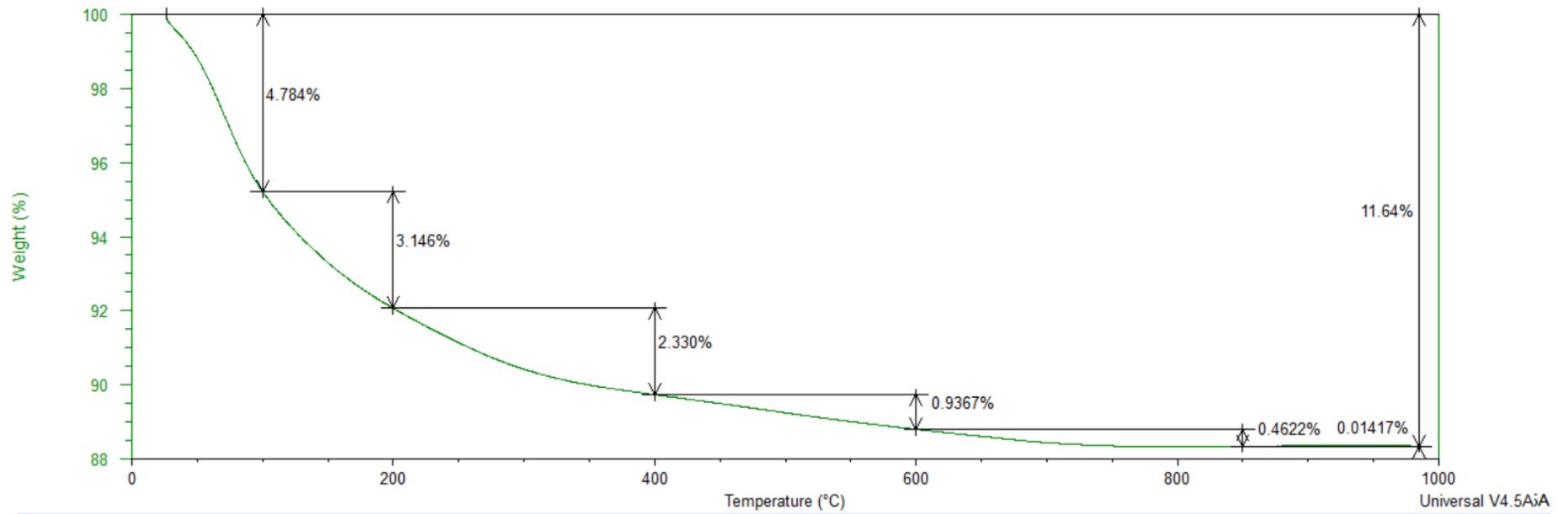
**Anexo B 3**

*Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa coco 0.15)*



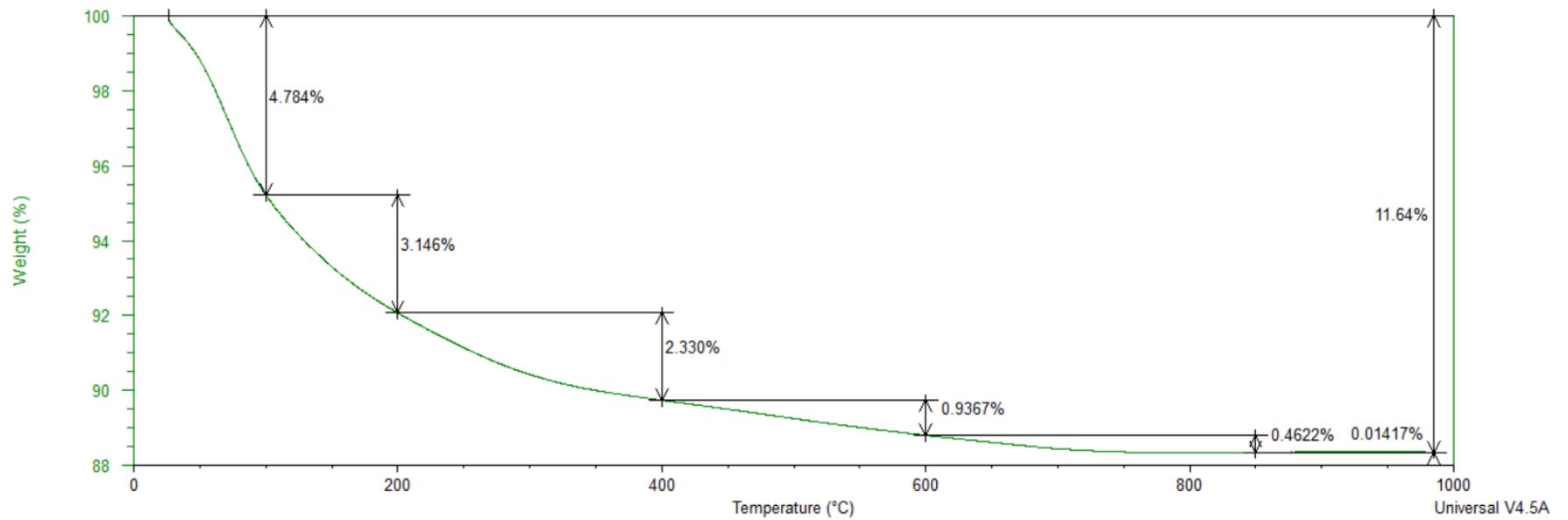
## Anexo B 4

### Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa caña 0.025)



## Anexo B 5

Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa caña 0.05)



## Anexo B 6

Termograma Geopolímero con reforzamiento (nanocelulosa caña 0.15)

