



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Título del Proyecto**

**MORTEROS, PARA LA IMPRESIÓN 3D CON ÁRIDOS LOCALES  
DE LA PROVINCIA DE MORONA SANTIAGO.**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil**

**Autor:**

Arteaga Ramón Jessiel Alexander  
Lascano Pérez Adriana Nathaly

**Tutor:**

Mgs. Marco Javier Palacios Carvajal

**Riobamba, Ecuador. 2023**

## DERECHOS DE AUTORÍA

Nosotros, Jessiel Alexander Arteaga Ramón, Adriana Nathaly Lascano Pérez con cédula de ciudadanía, 1400949812, 1804454013 autores del trabajo de investigación titulado: “Morteros, para la impresión 3D con áridos locales de la Provincia de Morona Santiago”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 17 de mayo de 2023.



---

Jessiel Alexander Arteaga Ramón

C.I: 1400949812



---

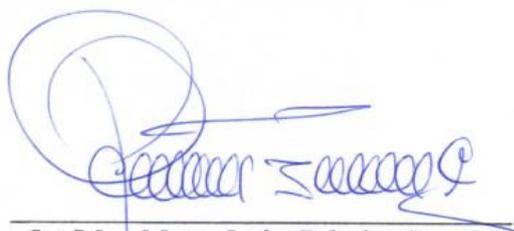
Adriana Nathaly Lascano Pérez

C.I: 1804454013

## **DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR**

Quien suscribe, Ing/Mgs. Marco Javier Palacios Carvajal, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: “Morteros, para la impresión 3D con áridos locales de la Provincia de Morona Santiago”, bajo la autoría de Jessiel Alexander Arteaga Ramón y Adriana Nathaly Lascano Pérez; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 17 días del mes de mayo de 2023.



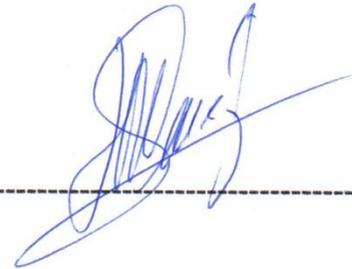
Ing/Mgs. Marco Javier Palacios Carvajal  
C.I: 0501325476

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Morteros, para la impresión 3D con áridos locales de la Provincia de Morona Santiago** por **Jessiel Alexander Arteaga Ramón, Adriana Nathaly Lascano Pérez**, con cédula de identidad número **1400949812, 1804454013**, bajo la tutoría de Mg. Marco Javier Palacios Carvajal; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 14 de Julio de 2023.

Ing. Jorge Núñez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Ing. Oscar Cevallos  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Ing. Andrés Marcillo  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



# CERTIFICADO ANTIPLAGIO



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO



## CERTIFICACIÓN

Que, **JESSIEL ALEXANDER ARTEAGA RAMÓN** con CC: 1400949812 y **ADRIANA NATHALY LASCANO PÉREZ** con CC: 1804454013, estudiantes de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL** Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**MORTEROS, PARA LA IMPRESIÓN 3D CON ÁRIDOS LOCALES DE LA PROVINCIA DE MORONA SANTIAGO**", cumple con el **4 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti-plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 10 de julio de 2023

Ing. Marco Javier Palacios Garvajal, MSc.

TUTOR

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo de investigación a mi madre Oliva Ramón y a mi padre Jonathan Arteaga por ser ese apoyo y ejemplo a lo largo de toda mi vida y ser esa ayuda incondicional para lograr esta meta.*

*A mis abuelitos Cesar Ramón y Zoila Ordoñez por siempre estar animándome y aconsejándome para lograr este objetivo.*

*A mis hermanos Jonathan y Jair por el apoyo brindado, por los recuerdos por las pelear por todo ya que esas cosas nos ayudan a entablar mayores lazos de hermandad.*

*A mis amigos y compañeros con quienes compartí esta etapa llamada Universidad que a pesar de las diferencias que haya existido quedan los buenos recursos y anécdotas que las llevare conmigo.*

**Jessiel A. Arteaga R.**

## **AGRADECIMIENTO**

*Ante todo, agradezco a Dios, por haberme dado la vida, acompañado a lo largo de mi carrera y darme la sabiduría y fortaleza para poder alcanzar esta meta además de darme unas padres ejemplares y extraordinarios para guiarme en la vida.*

*A mi madre Oliva Ramón y a mi padre Jonathan Arteaga por ser el vivo ejemplo de lo que quiero llegar a ser, por saber guiarme en este duro camino que es la vida, por aconsejarme y sobre todo darme amor incondicional, por todo el sacrificio realizado para poder cursar mis estudios y el apoyo incondicional para no desmayar y poder hacer realidad uno de mis sueños, por velar siempre por el bien mío y el de mis hermanos, por enseñarme que a pesar de las adversidades no me tengo que dar por vencido y que tengo en ellos mi lugar seguro.*

*A mis hermanos Jonathan y Jair quienes entre bromas y peleas fueron un apoyo para lograr este gran paso en mi vida y ser un ejemplo que todo lo que nos proponíamos podemos lograr.*

*Al fútbol y al G.O.A.T. Lionel Messi, por ser ese espacio de alegría y relajación mientras me encontraba lejos de mi familia y ser también un ejemplo de superación y que a pesar de las caídas tenemos que luchar por nuestros sueños que al final con la ayuda de Dios y nuestro esfuerzo todo es posible lograrlo.*

*A mis NAKAMAS, quienes siempre estuvieron aconsejándome y apoyándome para no darme por vencido y con quienes me llevo los mejores recuerdos de esta etapa llamada Universidad esperando que Dios los bendiga siempre y que podamos seguir compartiendo lazos de amistad.*

*A mi tutor de Tesis, Ing. Javier Palacios y a los demás docentes por ayudarnos con sus conocimientos y paciencia para poder realizar este trabajo de investigación.*

*A todas las personas que de una u otra forma me apoyaron para realizar esta meta*

**Jessiel A. Arteaga R**

.

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a mis padres Roberth Lascano, Gloria Pérez y Nelly Barragán, por todo su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y privilegio ser su hija, son los mejores padres.*

*A mi hermana y hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.*

*A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.*

***Adriana N. Lascano P.***

## **AGRADECIMIENTO**

*En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible esta investigación y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes.*

*A mis padres Roberth Lascano, Gloria Pérez y Nelly Barragán por todo su amor, comprensión y apoyo tanto moral como económico, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. No tengo palabras para agradecerles por las innumerables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que tomé a lo largo de mi vida, unas buenas, otras malas, otras locas. Gracias por darme la libertad de crecer como persona.*

*A mis hermanos Sandra, Roberth y Richard y a mi prima Jessica por llenarme de alegría día tras día, y estar siempre presentes aportando cosas buenas y su apoyo incondicional.*

*A mis amigos, con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas, a mi amiga incondicional Jenny por sus consejos, ánimos y su apoyo brindado a lo largo del camino.*

*A mi tutor Ing. Javier Palacios, y a los demás ingenieros que nos han guiado a lo largo de este trayecto. Gracias a su valiosa orientación, consejos y correcciones, hoy puedo finalizar exitosamente este trabajo.*

***Adriana N. Lascano P.***

# ÍNDICE GENERAL

PORTADA

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. Antecedentes.....	19
1.2. Problema.....	20
1.3. Justificación.....	20
1.4. Objetivos.....	22
1.4.1. General.....	22
1.4.2. Específicos.....	22
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Estado del arte .....	23

2.2. Dosificación de las muestras .....	24
2.3. Cemento Portland Tipo HE .....	25
2.4. Arenas (Árido Fino).....	25
2.5. Sika Plastocrete 161 HE .....	26
2.6. Características de los Morteros para impresión 3D.....	26
2.7. Prototipo de la Impresora 3D.....	27
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
3.1. Diagrama de la metodología asumida .....	31
3.2. Técnicas de recolección de datos.....	32
3.3. Instrumentos .....	32
3.4. Método de análisis estadístico, y procesamiento de datos.....	33
3.5. Población de estudio y tamaño de muestra.....	34
3.6. Hipótesis .....	35
3.7. Fases del procedimiento .....	35
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>37</b>
4.1. Determinación de las Impurezas Orgánicas .....	37
4.2. Análisis Granulométrico del árido fino .....	37
4.3. Contenido total de humedad .....	41
4.4. Determinación de la Densidad y Porcentaje de Absorción .....	43
4.5. Resumen de Resultados árido fino .....	44
4.6. Análisis Químico del árido fino.....	45
4.7. Efectos ensayo a compresión a edades tempranas.....	48
4.8. Efectos ensayo a compresión a largo plazo .....	49
4.9. Comparación del ensayo a compresión a largo plazo de las minas RU y RM con anteriores provincias estudiadas. ....	50
4.10. Ensayo de consistencia .....	53
4.11. Ensayo de Fluidez.....	53
4.12. Determinación del inicio y final de fraguado .....	54
4.13. Impresión 3D .....	55
4.13.1. Condiciones externas de los ensayos .....	55
4.13.2. Capacidad de bombeo.....	56
4.13.3. Estabilidad de los morteros.....	57

4.13.4. Tiempo trabajable de los morteros .....	58
4.13.5. Calidad de extrusión (Conformidad y Estabilidad Dimensional).....	59
4.13.6. Constructibilidad .....	61
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>64</b>
5.1. Conclusiones.....	64
5.2. Recomendaciones .....	65
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Dosificaciones elaboradas para un saco de cemento de 50 kg.....	24
Tabla 2.- Propiedades del cemento Portland Tipo HE. ....	25
Tabla 3.- Indicadores para la obtención de datos. ....	32
Tabla 4.- Instrumentos para obtención de datos. ....	33
Tabla 5.- Cantidad total de probetas. ....	35
Tabla 6.- Fases del procedimiento seguido en la investigación ....	35
Tabla 7.- Análisis Granulométrico del árido fino de la mina RU.....	38
Tabla 8.- Análisis Granulométrico del árido fino de la mina RM.....	39
Tabla 9.-Nueva nomenclatura a utilizar en gráficas de comparación.....	40
Tabla 10.- Contenido de humedad de la mina RU. ....	41
Tabla 11.- Contenido de humedad de la mina RM.....	42
Tabla 12.- Densidad y Porcentaje de absorción mina RU.....	43
Tabla 13.- Densidad y Porcentaje de absorción mina RM. ....	43
Tabla 14.- Resumen de ensayos de las propiedades físicas de la mina RU. ....	44
Tabla 15.- Resumen de ensayos de las propiedades físicas de la mina RM.....	45
Tabla 16.- Análisis Estadístico del ensayo a compresión a corto plazo mina RU y RM. ...	48
Tabla 17.- Análisis Estadístico del ensayo a compresión a largo plazo mina RU y RM ....	49
Tabla 18.- Consistencia de la mina RU. ....	53
Tabla 19.- Consistencia de la mina RM. ....	53
Tabla 20.- Fluidez recomendada para el mortero según algunos tipos de estructuras. ....	54
Tabla 21.- Fluidez de los morteros realizados con los áridos de las minas RU y RM. ....	54
Tabla 22.- Tiempo de fraguado de los morteros realizados con los áridos de las minas RU y RM.....	54
Tabla 23.- Observación Estadística ensayo de temperatura y humedad.....	55

Tabla 24.- Dosificación y Dosificación corregida para la impresión 3D para un saco de cemento.....	57
Tabla 25.- Estabilidad de los morteros elaborados con los áridos de las minas RU y RM.	57
Tabla 26.- Tiempo trabajable de los morteros. ....	58
Tabla 27.- Análisis Estadístico calidad de extrusión de los morteros modelo cuadrado.....	60
Tabla 28.- Análisis Estadístico calidad de extrusión de los morteros modelo triángulo.....	61
Tabla 29.- Tiempo inicial y final de fraguado de las probetas impresas. ....	61
Tabla 30.- Observación estadística deformaciones de hiladas modelo cuadrado.....	62
Tabla 31.- Observación estadística deformaciones de hiladas modelo triángulo.....	62
Tabla 32.- Análisis estadístico para deformaciones total de la primera hilada. ....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Configuración de la impresora en MatterControl 2.0.....	28
Figura 2.- Opción conectar manualmente la impresora en MatterControl 2.0.....	28
Figura 3.- Calibración de ejes x y z de la impresora 3D. ....	28
Figura 4.- Calibración del eje y de la impresora 3D.....	29
Figura 5.- Configuración de la impresión en MatterControl 2.0.....	29
Figura 6.- Modelos exportados en .stl de AutoCAD. ....	29
Figura 7.- Controles del extrusor.....	30
Figura 8.- Extrusor con mortero. ....	30
Figura 9.- Diagrama de flujo de la metodología asumida .....	31
Figura 10.- Identificación de impurezas orgánicas en los áridos RU y RM.....	37
Figura 11.- Curva Granulométrica mina RU. ....	39
Figura 12.- Curva Granulométrica mina RM. ....	40
Figura 13.- Comparación del módulo de finura con estudios previos y la norma.....	41
Figura 14.- Comparación del contenido total de humedad con investigaciones previas. ....	42
Figura 15.- Comparación del porcentaje de absorción con estudios previos. ....	44
Figura 16.- Observación química del agregado fino de la mina RU. ....	46
Figura 17.- Observación química del agregado fino de la mina RM. ....	47
Figura 18.- Comparación de Edades vs Resistencia a corto plazo de las minas RU y RM. ....	49
Figura 19.- Comparación de Días vs Resistencia a largo plazo de las minas RU y RM. ....	50
Figura 20.- Comparación de resistencias a compresión a 7 días con estudios previos. ....	51
Figura 21.- Comparación de resistencias a compresión a 14 días con estudios previos. ....	51
Figura 22.- Comparación de resistencias a compresión a 21 días con estudios previos. ....	52
Figura 23.- Comparación de resistencias a compresión a 28 días con estudios previos. ....	52
Figura 24.- Temperatura ambiente vs Variación durante la impresión del árido RU. ....	55

Figura 25.- Humedad ambiente vs variación durante la impresión del árido RU. ....	56
Figura 26.- Estabilidad de RU+HE vs Tiempo. ....	58
Figura 27.- Estabilidad de RM+HE vs Tiempo.....	58
Figura 28.- Calidad superficial de los morteros impresos .....	59

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Ensayo de compresión a corto plazo Mina Upano .....	68
Anexo 2.- Ensayo de compresión a corto plazo Mina Morona .....	69
Anexo 3.- Ensayo de compresión a largo plazo Mina Upano .....	70
Anexo 4.- Ensayo de compresión a largo plazo Mina Morona .....	71
Anexo 5.- Análisis químico de la Mina Upano .....	72
Anexo 6.- Análisis químico de la Mina Morona .....	72
Anexo 7.- Evidencia fotográfica del desarrollo de la investigación.....	72

## **RESUMEN**

La impresión 3D es una tecnología en desarrollo, que nos permite ahorrar dinero y tiempo en la industria de la construcción, sin embargo, esta tarea implica el uso de materiales con características particulares, así como la utilización de equipos y procedimientos diseñados para facilitar su aplicación en este campo. En el Ecuador esta tecnología no es muy aplicada, y su principal desafío está estrechamente vinculado con la búsqueda de un árido local que posibilite la elaboración de un mortero con las propiedades apropiadas para realizar la impresión. El objetivo de la presente investigación es elaborar un mortero con arena de río de las minas “Upano” y “Morona” de la parroquia Macas, provincia de Morona Santiago y cemento Portland Tipo HE, que resulte adecuado para la impresión 3D. Para lo cual, se elaboró probetas de mortero, las cuales se sometieron a diversos ensayos para verificar sus propiedades con las normas correspondientes, además de su comparación con estudios previos tanto en características físicas y químicas como resistencia de las probetas a corto y largo plazo para obtener el árido más conveniente a ser utilizado con esta tecnología. Los prototipos se imprimirán en formas cuadradas y triangulares en la impresora 3D. Los resultados nos demostraron que las arenas de los ríos cumplen con los parámetros necesarios para ser utilizadas en morteros imprimibles, las probetas elaboradas con la mina Upano y Morona presentaron una resistencia a los 28 días de 56,23 MPa y 53,62 MPa respectivamente, teniendo la mina Upano mejores resistencias, sin embargo, las dos minas presentaron resultados en resistencias mucho mejor que la mayoría de los estudios anteriores realizados en la zona tres del país.

## **PALABRAS CLAVES**

Impresión 3D, arena, mortero, resistencia, Morona Santiago.

## ABSTRACT

3D printing is a developing technology that saves us money and time in the construction industry. However, this printing technology requires materials with specific characteristics, equipment, and procedures to speed up its use in this area. In Ecuador, 3D printing is not widely used. The most significant difficulty for not using 3D printing is associated with the need for a local material that allows designing a mortar with the appropriate properties for printing. This research aimed to prepare a mortar with river sand from the Upano and Morona mines located in Macas parish, Morona Santiago province. Besides river sand, the mortar also used Type HE Portland cement, suitable for 3D printing. To build up the mortar, the researcher prepared test tubes subjected to tests to verify their characteristics compared to already established standards. This study also compared previous studies on physical and chemical characteristics and resistance of the test tubes in the short and long term to obtain the most suitable aggregate to be used with this technology. The prototypes will be printed in square and triangular shapes on the 3D printer. The results suggested that the river sands meet the necessary parameters for printable mortars. The samples made with the Upano and Morona mines presented a resistance at 28 days of 56,23 MPa and 53,62 MPa, respectively, with the Upano mine having better resistance. However, the two mines presented better resistance results than most previous studies in the third zone of the country.

## KEYWORDS

3D printing, sand, mortar, resistance, Morona Santiago.

Reviewed by

ADRIANA  
XIMENA  
CUNDAR  
RUANO

Firmado digitalmente  
por ADRIANA XIMENA  
CUNDAR RUANO  
Fecha: 2023.06.20  
1326607-49707

MsC. Adriana Cundar Ruano, Ph.D.

**ENGLISH PROFESSOR**

C.C. 1709268534

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

Al hablar de impresión 3D en la construcción, se refiere a una tecnología de punta que evoluciona constantemente convirtiéndose en una alternativa para las grandes empresas dedicadas a esta industria, por las numerosas ventajas que ofrece durante el desarrollo de la construcción como, la velocidad de ejecución de obra, la alta calidad de acabados y la optimización de mano de obra, materiales y recursos financieros (Mejías & Sanz Arauz, 2017).

La primera tecnología de impresión 3D comercializada fue la estereolitografía (SLA) creada por Chuck Hull en 1984 y fue acreditado como el inventor de la impresión 3D por crear y comercializar tanto SLA como el formato .stl, el tipo de archivo más utilizado para la impresión 3D (Guía Impresión, 2023).

La impresión 3D en la construcción comenzó a fines de la década de 1990 con los primeros intentos de extruir hormigón desde un robot controlado por computadora. A partir desde entonces, la impresión 3D viene teniendo un gran progreso hasta que, en el año 2014, se imprime el primer edificio comercial (Castro, 2021).

Esta tecnología se encuentra muy avanzada en países grandes y desarrollados como China, EE. UU., España, Rusia, Alemania, etc. Pero en Latinoamérica ya existen algunos países que han tomado la iniciativa y han comenzado con investigaciones como Chile, Perú, Guatemala, Colombia que incluso cuenta con una casa que fue ensamblada con 16 piezas impresas en 3D conocida como la “casa Origami” (Mar, 2021).

El Ecuador también ha comenzado con el estudio de áridos para ser utilizados en la impresión 3D, que según Hager et al. (2016), el reto más grande es encontrar el material más apropiado para esta tecnología, ya que estos deben cumplir ciertas características para que la impresión final sea óptima y eficaz. De estudios realizados, como el de Losso (2017), se sabe que el mortero de cemento debe ser lo suficientemente fluido para ser bombeado y al mismo tiempo suficientemente duro para que se mantenga en su forma, al ser impreso y según Luperi & Soffiatti (2016), el mortero debe ser capaz de aguantar el peso de las hiladas superiores a medida que la impresión avanza, ya que está directamente relacionado con la resistencia mecánica del material y la magnitud de carga aplicada. Además, debe tener una buena adherencia entre las distintas hiladas sucesivas, pero estas son solo algunas de las características que se deben considerar para la impresión.

Existen investigaciones anteriores en diversas zonas del país donde se analizaron las diferentes propiedades de los áridos procedentes de ríos y verificaron si cumple con los requisitos necesarios para ser utilizados en la elaboración de morteros, así como su calidad y efectividad al ser impresos. Pero en el Ecuador aún no se determina un árido a utilizar en el diseño de morteros imprimibles, ya que estos deben presentar características óptimas, para el diseño, comportamiento, funcionamiento e impresión, cumpliendo con los parámetros establecidos hasta la fecha. No obstante, la falta de un árido local que cumpla con las características adecuadas frena la implementación de esta tecnología en el Ecuador, porque

al ser importado se tendrá un incremento significativo en el costo del mortero, disminuyendo la viabilidad de la implementación de la impresión 3D, ya que no cumpliría con su principal objetivo que es el ahorro significativo de recursos y tiempo.

Esta investigación sigue la línea de investigaciones anteriores, pero sin utilizar cal hidráulica, flujo piroclástico ni cemento Portland Tipo I, por el hecho de que estos en todas las investigaciones anteriores presentaron menores resistencias, por tal razón se toma la decisión de elaborar los morteros con cemento Portland Tipo HE y la arena de los ríos de las minas Upano y Morona ubicadas en la provincia de Morona Santiago, enfocándose específicamente en el estudio de las propiedades físicas y químicas del árido, luego realizar pruebas de caracterización en los morteros, como fluidez, consistencia y tiempos de fraguado inicial y final. A continuación, se llevará a cabo ensayos de resistencia a compresión a corto plazo (3, 6, 9 y 12 horas) y a largo plazo (7,14,21 y 28 días). Finalmente, se evaluará si el mortero es adecuado para la impresión 3D, considerando capacidad de ser bombeado, la capacidad de ser impreso y su constructibilidad. Estos ensayos nos permitirán alcanzar los objetivos planteados.

Los resultados obtenidos de las propiedades físicas y sus resistencias a largo plazo se compararán con los obtenidos en las investigaciones previas de las provincias efectuadas por (Mariño, 2018) Chimborazo, (Taco, 2019) Tungurahua, (Llerena, 2020) Cotopaxi, (Vallejo, 2021) Pastaza.

## **1.2. Problema**

La implementación de la tecnología cada vez toma más fuerza en la industria de la construcción y su desarrollo no se detiene con la implementación de impresoras 3D. Esta tecnología se emplea en diferentes proyectos de construcción, en algunos países con el propósito de minimizar desperdicio de materiales, disminuyendo los plazos de ejecución y los costos en mano de obra. Sin embargo, para poder implementar la construcción 3D en el Ecuador, se debe profundizar el campo de investigación y estudiar a fondo los materiales que se van a utilizar.

En el Ecuador, en la Universidad Nacional de Chimborazo, se ha comenzado a estudiar áridos de diferentes minas provenientes de varias provincias, pero todavía no se cuenta con suficientes estudios para confirmar si alguno de estos áridos es el más apropiado para morteros imprimibles por lo que es necesario investigar otras zonas para poder comparar e identificar cuál muestra mejores resultados de sus áridos, para ser impresos.

Por ello, a través de esta investigación se busca aportar con el análisis de resultados, si la arena de los ríos de las minas Upano y Morona, ubicadas en la provincia de Morona Santiago, puedan resultar adecuados en la utilización de morteros imprimibles.

## **1.3. Justificación**

Actualmente, se está viviendo un período de constante evolución y existe una tecnología que está revolucionando la forma en que se fabrican muchos productos, procesos y servicios, una tecnología que está produciendo innovaciones revolucionarias en el ámbito de la construcción. Es la impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva y digital (Reyes, 2018).

La importancia de investigar los morteros imprimibles para la impresión de viviendas 3D se basa en varios aspectos clave como son:

- Eficiencia y rapidez en la construcción: La impresión 3D de morteros permite acelerar el proceso de construcción al eliminar la necesidad de ensamblaje manual de componentes individuales. Esto reduce significativamente el tiempo requerido para completar un proyecto y aumenta la eficiencia global de la construcción (PlanRadar, 2022).

- Diseño y personalización flexible: La impresión 3D permite la creación de diseños altamente personalizados y complejos que serían difíciles o costosos de lograr con métodos tradicionales de construcción. Esto ofrece una mayor libertad en la forma y función de las estructuras, lo que puede conducir a soluciones arquitectónicas innovadoras y eficientes en términos de recursos (Roselló Cruz, 2022).

- Reducción de residuos y uso de materiales: La impresión 3D utiliza solo la cantidad necesaria de material para construir una estructura, lo que minimiza el desperdicio de recursos. Además, se pueden utilizar materiales más sostenibles y reciclables en los morteros imprimibles, lo que contribuye a una construcción más ecológica y respetuosa con el medio ambiente (Roselló Cruz, 2022).

- Optimización de la resistencia y durabilidad: Los morteros imprimibles pueden formularse con aditivos y mezclas especiales que mejoran su resistencia, durabilidad y otras propiedades específicas. Esto permite la creación de estructuras fuertes y duraderas que cumplen con los estándares de construcción y resisten las condiciones ambientales adversas (PlanRadar, 2022).

- Reducción de costos: Aunque la inversión inicial en tecnología de impresión 3D puede ser significativa, a largo plazo, la construcción con morteros imprimibles puede ser más rentable. La reducción del tiempo de construcción, la optimización del uso de materiales y la eliminación de procesos adicionales pueden conducir a ahorros sustanciales en costos de mano de obra y materiales (Torres Remón, 2016).

La utilización de morteros imprimibles para la impresión 3D en construcción proporciona ventajas en términos de eficiencia, flexibilidad de diseño, sostenibilidad, resistencia y reducción de costos. Estos beneficios justifican su aplicación y fomentan la adopción de esta tecnología en la industria de la construcción, por tal razón en esta investigación se tiene el objetivo de estudiar los áridos de las minas Upano y Morona de la provincia de Morona Santiago para ver si son adecuados para la impresión 3D.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. General**

Elaborar un mortero con arena de río de las minas “Upano” y “Morona” de la parroquia Macas, provincia de Morona Santiago y cemento Portland Tipo HE, que resulte adecuado para la impresión 3D.

### **1.4.2. Específicos**

Determinar propiedades físicas y químicas del agregado fino de la provincia de Morona Santiago.

Determinar el comportamiento mecánico de los morteros realizados con agregado fino de la provincia de Morona Santiago.

Evaluar la resistencia del mortero con cemento Tipo HE a corto y largo plazo.

Comprobar la capacidad de bombeo, capacidad para ser impreso y constructibilidad de los morteros diseñados para la impresora 3D.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Estado del arte**

La impresión 3D es una técnica automatizada que se basa en crear formas libres mediante la superposición de hiladas, con la ayuda de una boquilla extrusora que se mueve a lo largo de un camino predeterminado extruyendo mortero fresco (Sanchez Izquierdo, 2022). Este proceso de construcción tiene varias ventajas, como reducir los accidentes laborales, el uso optimizado del material lo que resulta en una reducción de la cantidad de residuos y la huella de carbono, la rapidez de ejecución y la reducción de los costos. Además de tener libertad geométrica en el diseño (Torres Remón, 2016). Sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en desarrollo y todavía hay desafíos que deben superarse, como la calidad del material.

En el Ecuador, en la Universidad Nacional de Chimborazo se ha comenzado con una línea de investigación del diseño de morteros con áridos de algunas provincias del país. A continuación, se presentará un resumen del avance obtenido hasta la fecha.

#### **Arena de río de la provincia de Chimborazo (mina Penipe)**

En el año 2018, la Ingeniera Mariño Carmen comenzó con esta línea de investigación, tomando como referencia la dosificación utilizada por Khalil et al. (2017), se realizó siete dosificaciones, las cuales variaban en tipo de cemento (Portland, Tipo I y HE), porcentaje de cal hidráulica y plastificante, se evaluaron sus características físicas y mecánicas. Posteriormente, se escogieron cuatro dosificaciones definitivas, las que presentaron mejores resistencias, concluyendo que la adición de cal hidráulica a los morteros baja la resistencia y que los morteros si son aptos para la impresión 3D porque cumplen con los parámetros requeridos que son trabajabilidad, tiempo de fraguado y resistencia (Mariño, 2018).

#### **Arena de río de la provincia de Tungurahua (mina Nieto)**

En el año 2019, la Ingeniera Taco Pamela con el fin de evaluar y comparar las características físicas y mecánicas del mortero elaborado con la arena de la mina Nieto provincia de Tungurahua contra el elaborado de la mina Penipe provincia de Chimborazo utiliza las dosificaciones planteadas por Mariño (2018), realizó cuatro morteros y evaluó sus características, confirmando que la cal hidráulica baja las resistencias a las dosificaciones, y que los morteros diseñados con esta arena tiene menores resistencias que las diseñadas con la arena de la provincia de Chimborazo, pero que si son aptas para la impresión 3D (Taco, 2019).

#### **Prototipo de Impresora 3D**

En el año 2019, la Ingeniera Ortega Sandra construye el primer prototipo de impresora 3D y comprueba si los morteros realizados por (Mariño, 2018) y (Taco, 2019) son imprimibles, los cuales resultan que sí, pero en el mortero realizado con la arena de la provincia de Tungurahua se requirió una variación en la cantidad de aditivo para lograr su compatibilidad con el prototipo y el realizado con la arena de la provincia de Chimborazo

necesitó un tiempo de reposo de 7 minutos previo a su uso para evitar el escurrimiento (Carvajal et al., 2021).

### **Arena de río de la provincia de Cotopaxi (mina Segundo Chacón)**

En el año 2020, el Ingeniero Llerena Ayrtón, siguiendo la misma línea de investigación, realizó cuatro morteros con las dosificaciones ya establecidas anteriormente y evaluó sus propiedades físicas y mecánicas, concluyendo que su árido tiene un módulo de finura más bajo que los estudiados por (Mariño, 2018) y (Taco, 2019) pero no se puede afirmar que esta propiedad física del árido, sea el más conveniente para morteros imprimibles, además la resistencia a compresión de sus tres morteros a los 28 días fueron las más bajas (Llerena, 2020).

### **Arena de río de la provincia de Pastaza (mina Santa Isabel y Trópico de Capricornio)**

En el año 2021, la Ingeniera Vallejo Karina, siguiendo la misma línea de investigación, toma como referencia las dosificaciones planteadas anteriormente, pero sustituyendo la cal hidráulica por flujo piroclástico. Realizó ocho morteros y evaluó sus propiedades físicas y mecánicas, concluyendo que los morteros diseñados con el árido de la mina Santa Isabel y cemento Portland Tipo HE sin flujo piroclástico exhibieron mayores resistencias a los 28 días, pero para la impresión 3D las dos arenas de las minas, más cemento Portland Tipo HE demostraron ser adecuadas en términos de capacidad de bombeo, estabilidad de morteros, calidad superficial, conformidad y estabilidad dimensional y constructibilidad (Vallejo, 2021).

## **2.2. Dosificación de las muestras**

La dosificación utilizada en esta investigación fue diseñada por (Mariño, 2018) en donde ella se basa en una dosificación encontrada en la investigación de (Khalil et al., 2017), la Ingeniera Mariño realiza siete dosificaciones donde modifica tres aspectos: cantidad de cal, tipo de cemento (Portland, Tipo I y HE), y cantidad de plastificante, luego de los ensayos respectivos se escogieron cuatro dosificaciones las que presentaron mejores resistencias a la compresión. En la Tabla 1 se presentan las dosificaciones escogidas, las cuales fueron elaboradas para un saco de cemento de 50 kg.

**Tabla 1.-** Dosificaciones elaboradas para un saco de cemento de 50 kg.

	<b>M-0-I</b>	<b>M-7-I</b>	<b>M-0-HE</b>	<b>M-7-HE</b>
Arena (kg)	62,25	67,2	62,25	67,2
Cemento (kg)	50,00	50,00	50,00	50,00
Cal (kg)	0,00	3,50	0,00	3,50
Agua (kg)	21,00	25,45	20,75	22,45
Plastificante (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00

**Fuente:** (Mariño, 2018)

En esta investigación se trabaja con la dosificación M-0-HE (M=Mortero, 0= porcentaje de cal, HE= Tipo de cemento) ya que en investigaciones anteriores se comprobó que esta es la que mejores resistencias presenta. La abreviación utilizada para las dosificaciones de esta investigación será RU+HE (RU= Río Upano, HE= Tipo de cemento) y RM+HE (RU= Río Morona, HE= Tipo de cemento).

### 2.3. Cemento Portland Tipo HE

El cemento es un material de construcción utilizado como conglomerante, que tiene la propiedad de endurecerse gradualmente al entrar en contacto con el agua. Es un polvo fino y suave, que se obtiene al combinar y moler caliza y arcilla previamente calcinadas. Es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo y se utiliza tanto en la fabricación de hormigón como en la elaboración de morteros para mampostería, entre otros usos en la construcción. El cemento se produce en diferentes tipos, cada uno con propiedades específicas para diferentes aplicaciones en la construcción (Ferrovia, 2023).

En esta investigación se utilizó el cemento Portland Tipo HE porque ofrece altas resistencias a edades tempranas, normalmente una semana o menos, las partículas de este tipo de cemento son molidas más finamente, por lo que se usa para un desencofrado rápido (UCEM, 2023). En la Tabla 2 se presenta las características principales de este cemento.

**Tabla 2.-** Propiedades del cemento Portland Tipo HE.

<b>Requisitos físicos</b>	<b>Cemento Chimborazo Superior Portland Tipo HE</b>	
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,92	NTE INEN 856
Expansión en autoclave (%)	0,0013	NTE INEN 200
Fraguado Vicat inicial (min)	150	NTE INEN 158
Fraguado Vicat final (min)	240	NTE INEN 158
<b>Resistencia a la compresión</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>MPa INEN NTE 488</b>
1 día	184	18
3 días	255	25
7 días	337	33
28 días	459	45
Resistencia a los sulfatos	Cemento IP	
% Expansión a los 14 días	0,04 máx. INEN NTE 2503	

**Fuente:** (UCEM, 2023)

### 2.4. Arenas (Árido Fino)

Las arenas utilizadas para mezclas de morteros suelen estar compuesto por partículas de tamaño inferiores a 8 mm y puede ser de diferentes materiales, como arena de río, arena de cantera, polvo de piedra, entre otros. Es importante seleccionar el tipo de árido fino adecuado para obtener las propiedades deseadas en el mortero, incluyendo la trabajabilidad,

adhesión, resistencia, y durabilidad. Asegurarse de cumplir con las normas relacionadas con la calidad de los áridos es esencial para obtener mezclas homogéneas y de alta calidad en morteros (Torres Remón, 2016). En esta investigación se ocupa arenas de río de las minas Upano y Morona las cuales están ubicadas en la provincia de Morona Santiago.

## 2.5. Sika Plastocrete 161 HE

Sika Plastocrete 161 HE es un aditivo líquido para hormigón fabricado por la compañía Sika. Está formulado para cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C-494 Tipo E, lo que implica que es un aditivo químico que actúa como reductor de agua y acelerante de fraguado que contribuye a reducir los tiempos de fraguado del concreto (Sika, 2023). También puede utilizarse para mejorar la trabajabilidad del concreto y reducir el contenido de agua en la mezcla, lo que puede resultar en una mayor resistencia y durabilidad del concreto. Es particularmente útil en la preparación del concreto en climas fríos, ya que puede acelerar el fraguado del concreto a temperaturas más bajas. Sin embargo, es importante seguir las instrucciones de uso proporcionadas por el fabricante para obtener los mejores resultados.

## 2.6. Características de los Morteros para impresión 3D

El material de impresión es uno de los principales elementos que actúan en el proceso de la impresión 3D, por tal razón es de mucha importancia conocer las propiedades que el mortero en estado fresco debe tener para ser impreso. Actualmente, se han realizado varios estudios en los cuales se han planteado las propiedades críticas y más importantes de un mortero imprimible, ya que este debe ser transportado por un sistema de suministro, luego tiene que pasar por el sistema de extrusión y finalmente, extruir el material hilada por hilada con una calidad, unión y resistencia aceptable (Reyes, 2018).

Las cinco principales propiedades seleccionadas en estado fresco que debe tener una mezcla de impresión son:

**Capacidad de Bombeo:** Es la capacidad de la mezcla para pasar a través del sistema de alimentación y extrusión sin bloquearse ni obstruirse, además de mantener un flujo constante para la extrusión. Por lo que el mortero debe ser muy trabajable (fluido) y para lograr esto se debe diseñar una dosificación adecuada, Además la mezcla debe mantenerse con las características mencionadas durante un tiempo determinado ya que no puede fraguarse inmediatamente. Por otra parte, cabe recalcar que esta característica va de la mano con la calidad de extrusión ya que no se puede esperar una buena calidad de extrusión con una mala capacidad de bombeo del mortero (Reyes, 2018).

**Calidad de extrusión:** Son las características y propiedades que debe tener la hilada impresa para tener una calidad de extrusión aceptable, estas son:

- **Calidad Superficial:** Se refiere al hecho de que la hilada impresa no debe tener defectos superficiales como grietas, huecos, segregaciones etc. (Reyes, 2018).
- **Conformidad dimensional:** Se refiere a que las medidas impresas deben estar dentro de un rango aceptable con las medidas de diseño (Reyes, 2018).
- **Estabilidad dimensional:** Hace alusión a la capacidad que tiene la hilada impresa para mantener su conformidad dimensional a lo largo del tiempo, la cual

debe ser impresa continuamente y no presentar cortes o reducciones en la sección transversal (Reyes, 2018).

**Trabajabilidad:** Se refiere a la facilidad de la mezcla para ser transportada, colocada, compactada y acabada sin esfuerzo excesivo y sin que produzca segregaciones. Este parámetro es clave y se encuentra relacionado con todas las propiedades descritas, por esta razón, el control de este es esencial para tener un buen funcionamiento de la impresión 3D (Reyes, 2018).

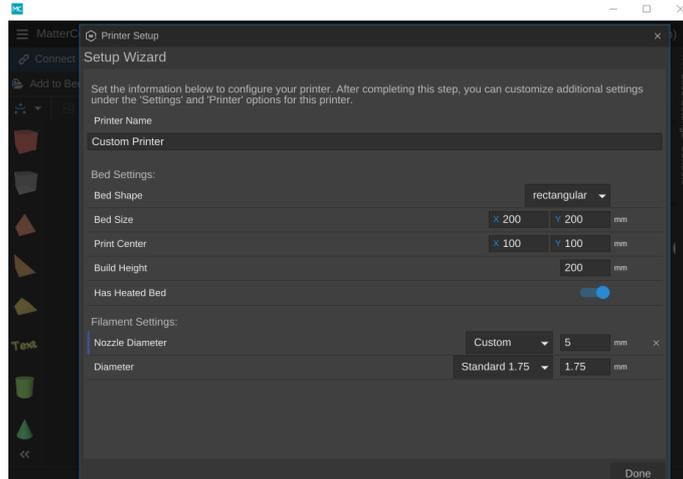
**Tiempo trabajable de los morteros:** Es un parámetro muy importante que debe tenerse en cuenta en el proceso de impresión 3D, principalmente debido al comportamiento del hormigón, que tiene propiedades dependientes del tiempo, como el proceso de fraguado y endurecimiento. Por ejemplo, es inútil si la mezcla es apta para la extrusión solo durante unos segundos, si luego de estos el sistema de extrusión se bloquea y finaliza la impresión. El tiempo trabajable está relacionado con la trabajabilidad por tal razón este será óptimo cuando la trabajabilidad se encuentre en un nivel que se mantenga la capacidad de bombeo y calidad de extrusión (Reyes, 2018).

**Constructibilidad:** Capacidad del mortero para ser estructurado en hiladas sucesivas sin experimentar deformaciones significativas, debido a que tiene que aguantar el peso propio, el de las hiladas superiores y la presión de la extrusión, además tiene que asegurar una buena adherencia y unión entre hiladas para que se cree componentes compactos. Esto estará determinado por el tiempo de fraguado y endurecimiento del material, así como por la resistencia a la compresión que exhiba la mezcla, garantizando la estabilidad del elemento a medida que aumenta en tamaño. (Reyes, 2018).

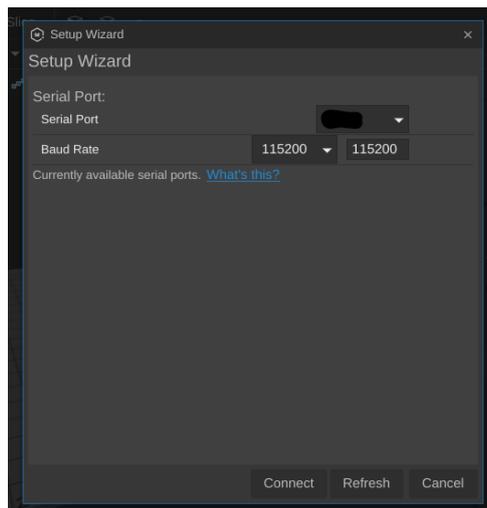
## 2.7. Prototipo de la Impresora 3D

La impresora 3D fue construida por la Ingeniera Ortega Sandra, la cual adquirió una impresora 3D Anet A8 y la adaptó para morteros. El software utilizado para imprimir es el MatterControl 2.0 el cual nos permite controlar y monitorear la impresión cuando está conectado a través de la USB, a continuación, se explicará brevemente los pasos para poder imprimir en el prototipo 3D.

**Conexión a la computadora:** Una vez instalado el software MatterControl 2.0, lo abrimos y le damos en configurar nueva impresora, definir nueva nos llevará a una nueva ventana en donde se debe cambiar el diámetro de la boquilla a 5 mm tal como se puede observar en la Figura 1 le damos en aceptar y se ingresará a la página principal. Encendemos la impresora y nos vamos a la opción conectar la cual se encuentra en la parte superior izquierda y seleccionamos la opción conectar manualmente, en esta ventana seleccionaremos el puerto en donde está conectado la impresora y el Baud Rate se cambiará a como se presenta en la Figura 2, le damos en conectar y la impresora estará lista para imprimir.

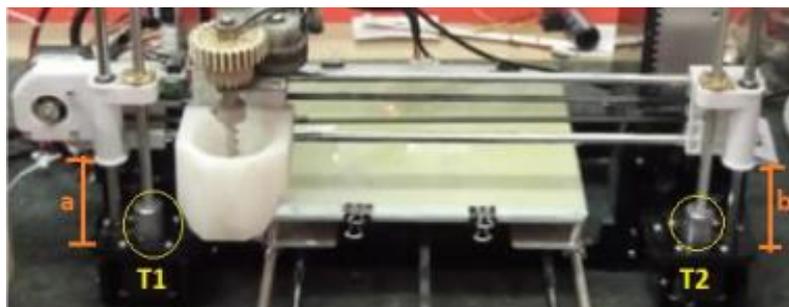


**Figura 1.-** Configuración de la impresora en MatterControl 2.0

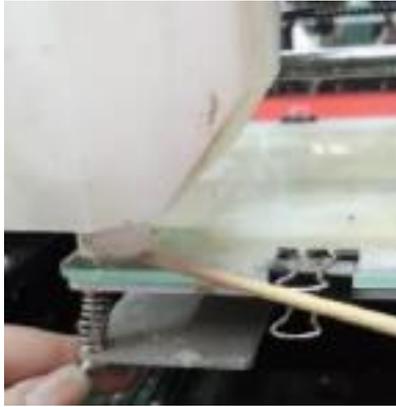


**Figura 2.-** Opción conectar manualmente la impresora en MatterControl 2.0

**Calibración de la impresora.** - Los ejes x, y, z se deben calibrar antes de realizar la impresión, para esto se debe medir las distancias a y b presentadas en la Figura 3 con un calibrador y moviendo los tornillos T1 y T2 igualarlas, para el eje y se debe mover la cama con la ventana de controles que nos da el software, esta se debe llevar al filo del extrusor y mediante los tornillos mariposas que se encuentran debajo de la cama moverlos hasta colocar el extrusor en la posición inicial el cual debe estar 3 mm dentro de cada esquina de la cama como se observa en la Figura 4.

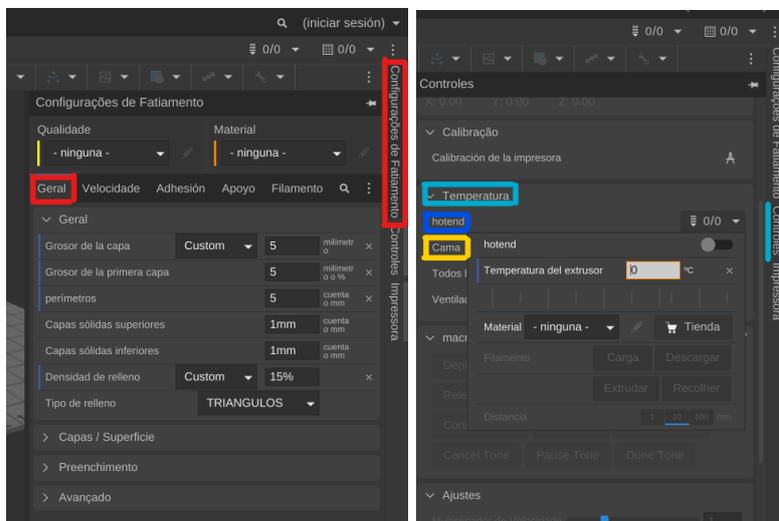


**Figura 3.-** Calibración de ejes x y z de la impresora 3D.



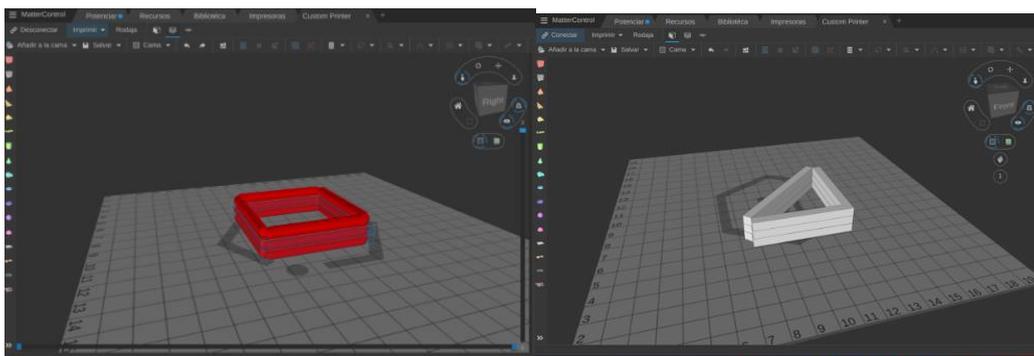
**Figura 4.-** Calibración del eje y de la impresora 3D.

**Ajustes para imprimir.** - Nos vamos a la configuración de filamento y en la pestaña general cambiamos los valores como se presenta en la Figura 5, luego nos vamos a la opción de controles, temperatura y escogemos, temperatura del extrusor, este es importante que se le deje en 0 °C para evitar daños en el mismo, luego en la temperatura de la cama (base de la impresora) se le debe dejar en 60 °C.



**Figura 5.-** Configuración de la impresión en MatterControl 2.0

**Archivos para Imprimir.** - Los modelos pueden ser dibujados en programas como AutoCAD, y exportados en extensión .stl, los archivos se abren desde el programa y se puede observar en tres vistas: vista del modelo, vista de capa 3D y vista de capa 2D.



**Figura 6.-** Modelos exportados en .stl de AutoCAD.

Una vez ya realizados todos los puntos anteriores se debe imprimir, para esto como se mencionó anteriormente este es un prototipo adaptado, por lo que al momento que la impresora comience a imprimir nosotros debemos estar pendientes para encender el extrusor. El control se encuentra en la parte superior de la impresora como se puede ver en la Figura 7, este cuenta con tres botones, el de la mitad es para encender y apagar, el primero para aumentar la velocidad y el último para bajar la velocidad. Se recomienda que antes de comenzar la impresión se encienda el extrusor para configurar la velocidad y dejar que el material pase por la boquilla.



**Figura 7.-** Controles del extrusor.

**Limpieza del extrusor.** – Una vez terminada la impresión se debe proceder inmediatamente al lavado de este, porque al trabajar con material cementante este al instante comienza a fraguarse como se observa en la Figura 8 y hace que se bloquee el sistema de extrucción, por lo tanto, se debe prender el extrusor e introducir agua, y con ayuda de un alambre remover los restos de material hasta que esté completamente limpio.



**Figura 8.-** Extrusor con mortero.

## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El enfoque de nuestra investigación fue cuantitativo debido a que se realizará ensayos para evaluar las propiedades físicas y químicas de la muestra de arena y los ensayos de las probetas, los cuales nos servirán para probar la hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico. Teniendo un alcance explicativo por que se genera un nuevo material cementicio que resulte beneficioso para la impresión en 3D.

Se llevó a cabo un diseño experimental puro, el cual nos brindará información precisa sobre la arena de los ríos Upano y Morona de la provincia de Morona Santiago. Mediante ensayos de laboratorio, se determinaron las propiedades físicas y químicas de dicha arena, y se evaluó la resistencia, consistencia, fluidez y tiempo de fraguado del mortero diseñado con diferentes dosificaciones para su uso en la impresión 3D, basándose en su comportamiento durante el proceso de impresión. Se compararon las probetas de mortero con investigaciones previas para determinar si estos agregados presentan resistencias superiores o son más adecuados para la impresión 3D.

### 3.1. Diagrama de la metodología asumida

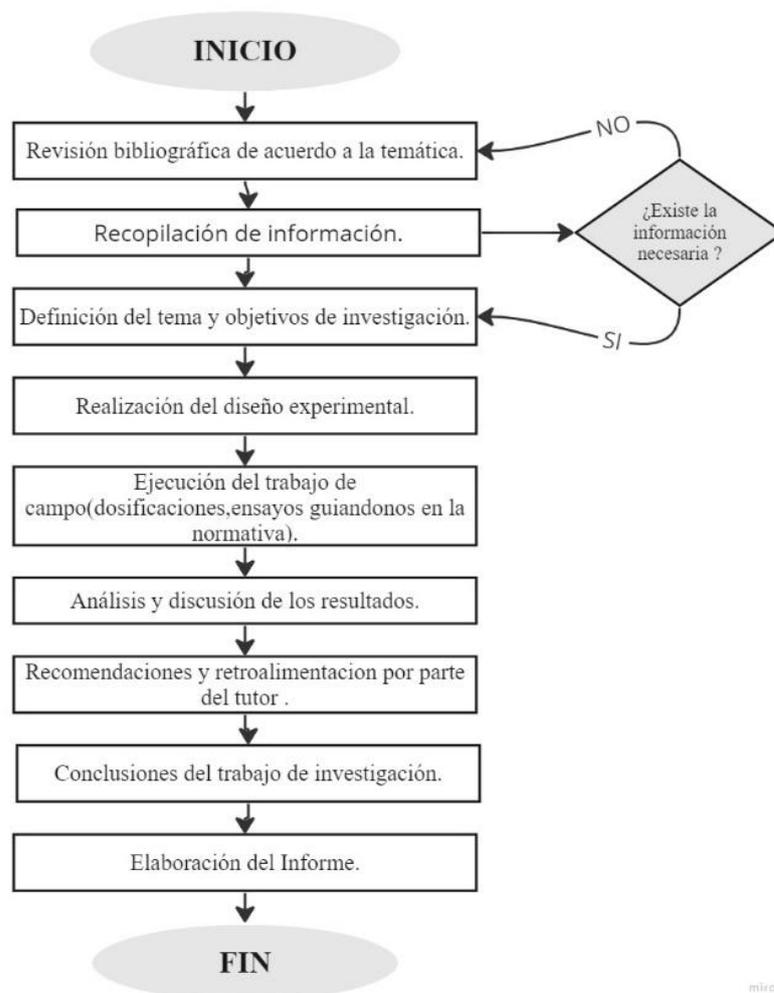


Figura 9.- Diagrama de flujo de la metodología asumida

Partiendo de la revisión bibliográfica se sintetizó la información más relevante para la elaboración de morteros 3D.

### 3.2. Técnicas de recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizará una serie de ensayos (procedimientos) e instrumentos confiables, precisos y exactos que nos permitirán reunir estos datos mediante la medición con un propósito específico.

**Tabla 3.-** Indicadores para la obtención de datos.

<b>Ensayos</b>	<b>Normas</b>	<b>Indicadores</b>
Determinación de las Impurezas Orgánicas	INEN NTE 855	-Porcentaje de impurezas. - Comparador de colores normalizado
Análisis Granulométrico	INEN NTE 696, INEN NTE 872	-Rango mínimo 2,3 superior 3,1. -Curva granulométrica dentro de los límites especificados.
Contenido total de humedad	INEN NTE 862	-Porcentaje de contenido de agua.
Determinación de la densidad y porcentaje de absorción	INEN NTE 856	- Densidad SH, Densidad SSS Y Aparente. - Porcentaje de Absorción
Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, corto plazo	INEN NTE 488	-Edad de ensayo de cubos 3,6,9 y 12 horas.
Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, largo plazo	INEN NTE 488	- Edad de ensayo de cubos 7,14,21 y 28 días.
Consistencia	INEN NTE 157	-Consistencia normal cuando la varilla penetra 10mm $\pm$ 1 mm del mortero.
Fluidez	INEN NTE 2502	-Diámetro del mortero, 110 $\pm$ 5 %
Tiempo de fraguado inicial y final	INEN NTE 158	-Tiempo de Fraguado por medio de aguja Vicat - Tiempo Inicial y Final.

La Tabla 3 nos indica los ensayos a realizarse y los indicadores que se consideraran para cada uno de estos de acuerdo con la normativa presentada.

### 3.3. Instrumentos

Los instrumentos son medidores, recipientes y otras herramientas para realizar síntesis y análisis en el ámbito de los diversos trabajos de laboratorio requeridos.

**Tabla 4.- Instrumentos para obtención de datos.**

<b>Ensayo</b>	<b>Instrumentos</b>
Determinación de las Impurezas Orgánicas	-Botellas graduadas de 240cm <sup>3</sup> a 470cm <sup>3</sup> . -Comparador de colores normalizados.
Análisis Granulométrico	-Balanza precisión 0,1 g. -Tamices. -Horno temperatura 110 ± 5 °C.
Contenido total de humedad	-Balanza sensibilidad 0,1%. -Horno temperatura 110 ± 5 °C. -Recipientes para las muestras.
Determinación de la densidad y porcentaje de absorción	-Balanza capacidad de 1 kg o más, sensibilidad de 0,1 g. -Picnómetro. -Molde y compactador para la humedad superficial. -Horno temperatura 110 ± 5 °C.
Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, corto plazo	-Balanza precisión y desviación a una carga de 2000 g. -Probetas graduadas de precisión ± 2cm <sup>3</sup> a 20 C. -Moldes cúbicos de 50 mm. -Máquina de ensayo.
Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, largo plazo	-Balanza precisión y desviación a una carga de 2000 g. -Probetas graduadas de precisión ± 2cm <sup>3</sup> a 20 C. -Moldes cúbicos de 50 mm. -Máquina de ensayo.
Consistencia	-Probetas graduadas de 200cm <sup>3</sup> a 250 cm <sup>3</sup> . -Aparato Vicat -Anillo cónico de Vicat -Varilla desmontable 300g ± 0,5 g.
Fluidez	-Mesa de flujo y molde de flujo. -Calibrador. -Compactador
Tiempo de fraguado inicial y final	-Aparato Vicat -Anillo cónico de Vicat -Aguja recta diámetro de 1 mm ± 0,05 mm. -Balanza precisión y desviación a una carga de 1000 g. -Vasos graduados de 200cm <sup>3</sup> o 250cm <sup>3</sup> .

En la Tabla 4 se presenta los principales instrumentos que se utilizarán en los ensayos, además se debe tener en cuenta que estos deben cumplir con la precisión, confiabilidad y una excelente calibración para no tener errores en los datos.

### **3.4. Método de análisis estadístico, y procesamiento de datos**

Mediante la experimentación manipularemos variables independientes (árido y cemento) para analizar las consecuencias que tienen estas en variables dependientes

(mortero) dentro de una situación de control (normas). Probando sistemáticamente una hipótesis.

Se realizó el análisis estadístico para conocer la tendencia central y la dispersión de los datos obtenidos de los diferentes ensayos realizados permitiéndonos una mejor comprensión de los resultados.

La media es una medida de tendencia central que se calcula sumando todos los valores de la variable y dividiéndolos por el número total de observaciones. Proporciona una idea de la ubicación promedio de los datos.

La desviación estándar, por otro lado, es una medida de dispersión que indica cuánto se alejan los datos individuales de la media. Muestra qué tan dispersos están los datos alrededor de la media.

### **3.5. Población de estudio y tamaño de muestra**

Para las muestras se tomó un metro cúbico de arena de los ríos Upano (Coordenadas 2°18'03,79"S, 78°06'21,13"O) y Morona (3°03'28,39" S, 77°59'56,69"O), son áridos finos en estado natural, que no serán tamizados in situ, sino que se obtendrán tal y como la máquina excavadora los saca de los ríos, conteniendo impurezas y partículas gruesas que serán retiradas mediante los ensayos para determinar sus propiedades físicas.

En los ensayos de resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, se necesita encontrar valores en diferentes edades por lo que se empleará las expresiones a corto plazo para horas y largo plazo para días como lo determina (Torres Remón, 2016) en su investigación denominada "Diseño de hormigón para impresión en 3D".

**Resistencia a la Compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista a corto plazo:** Se realizarán para edades de 3, 6, 9 y 12 horas, elaborando un total de seis probetas para cada edad, perteneciendo tres a cada tipo de dosificación planteada en esta investigación.

**Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista a largo plazo:** Se realizarán para edades de 7, 14, 21 y 28 días, elaborando un total de seis probetas para cada edad, perteneciendo tres a cada tipo de dosificación planteada en esta investigación.

**Consistencia:** Se tomará cuatro probetas de mortero para cada tipo de dosificación planteada en esta investigación.

**Fluidez:** Se tomará una probeta de mortero para cada tipo de dosificación planteada en esta investigación.

**Tiempo de fraguado inicial y final:** Se tomará una probeta de mortero para cada tipo de dosificación planteada en esta investigación.

**Tabla 5.-** Cantidad total de probetas.

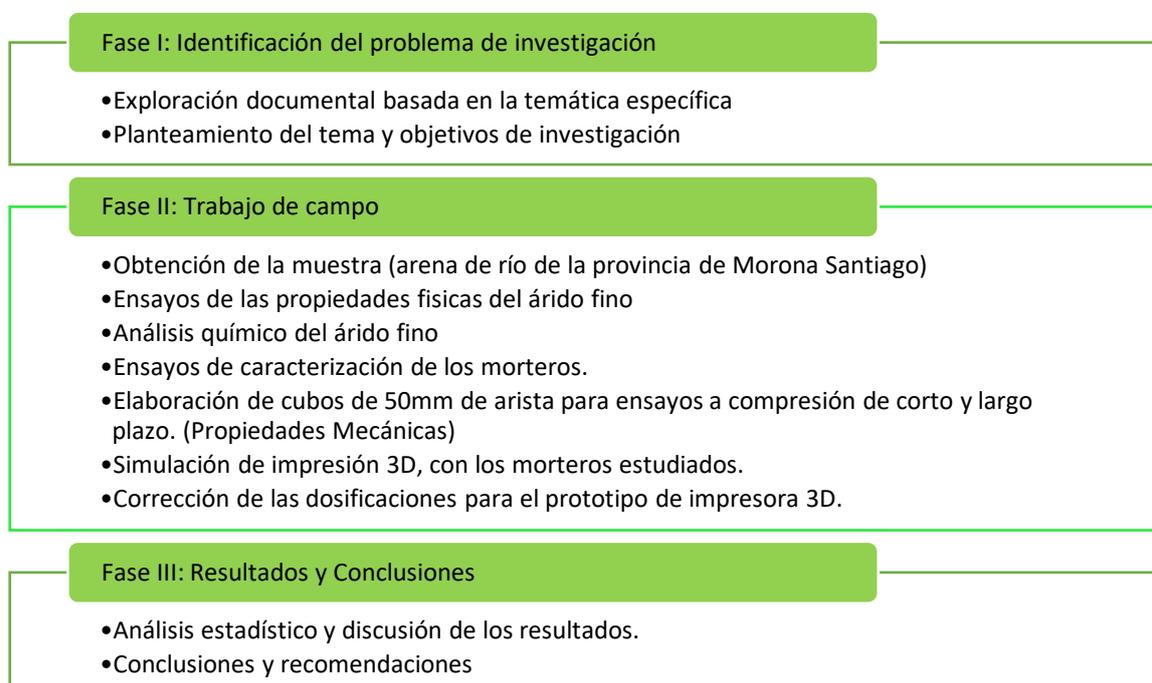
<b>Ensayo</b>	<b>Normas</b>	<b>Probetas</b>
Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, corto plazo	INEN NTE 488	24
Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, largo plazo	INEN NTE 488	24
Consistencia	INEN NTE 157	8
Fluidez	INEN NTE 2502	2
Tiempo de fraguado inicial y final	INEN NTE 158	2

### 3.6. Hipótesis

La arena de los ríos de la mina Upano y la mina Morona pertenecientes a la provincia de Morona Santiago cumplen con los parámetros para ser considerado agregado fino de uso en morteros imprimibles.

### 3.7. Fases del procedimiento

**Tabla 6.-** Fases del procedimiento seguido en la investigación



En la Tabla 6 se presenta las tres fases en que se dividirá el proyecto de investigación, las cuales son:

**Fase I:** Identificación del problema de investigación, se procedió con la exploración documental en Google académico, ProQuest y el repositorio de la UNACH dentro de un lapso de 5 a 10 años a partir de la fecha actual, se descubrieron una variedad de documentos en formato PDF, que incluyen artículos científicos, libros y tesis, los cuales proporcionan información destacada y relevante sobre la tecnología de impresión 3D, procediendo a

categorizar los textos según nuestra pregunta de investigación para así poder realizar un análisis crítico de la literatura encontrada.

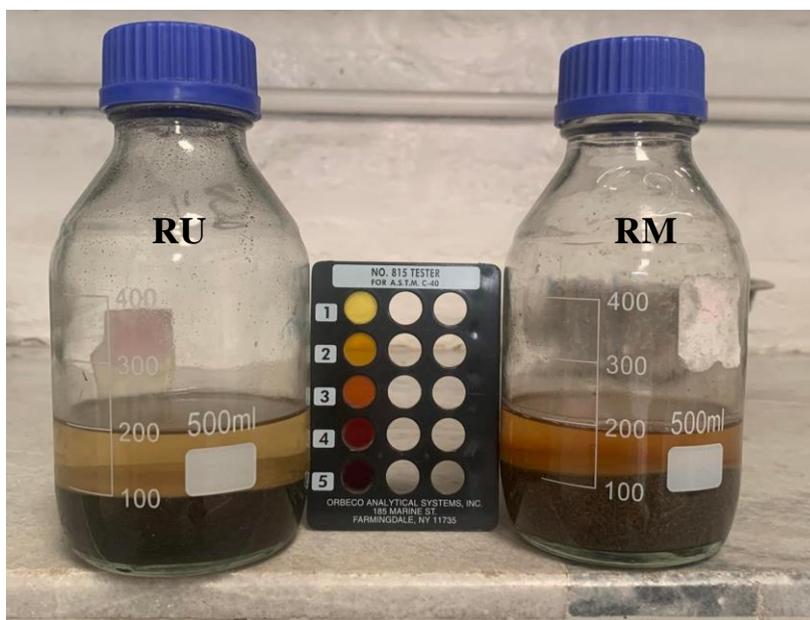
**Fase II:** Trabajo de campo, se analizó y se realizó los ensayos necesarios para determinar tanto características físicas como químicas de los áridos, guiándonos en la normativa INEN NTE, se procedió a realizar muestras cúbicas de mortero de 50mm y se realizó el ensayo a compresión a corto y largo plazo para obtener sus resistencia, además se realizaron ensayos para conocer las propiedades mecánicas del mortero, y se imprimió en el prototipo de impresora 3D existente en la Universidad Nacional de Chimborazo.

**Fase III:** Resultados y Conclusiones, se describió los resultados obtenidos y se realizó su análisis estadístico, además se comprobó que los resultados son positivos con base a la hipótesis planteada, obteniendo como conclusión general que el árido cumple con las características para ser utilizado en la impresión 3D.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Determinación de las Impurezas Orgánicas

En base a la Figura 10 según la escala de Gardner se observa que la muestra de la mina RU corresponde a una numeración N°1 y para la mina RM corresponde a una numeración N°2 indicándonos que estas muestras tienen un bajo contenido de impurezas orgánicas y son adecuadas para la preparación de morteros de acuerdo a la norma (INEN NTE 855, 2010).



**Figura 10.-** Identificación de impurezas orgánicas en los áridos RU y RM.

Estos áridos se encuentran libres de impurezas orgánicas perjudiciales, ya que su decoloración es inferior e igual al N°3, de no ser este el caso en la norma (INEN NTE 872, 2011) nos dice que se debería rechazar el árido excepto en:

- a) Se debe realizar un análisis químico para ver si existe la presencia de carbón, lignito o partículas discretas similares, lo cual produce que su decoloración sea más oscura.
- b) El árido debe cumplir con una resistencia no menor a 95% en los 7 días, calculada de acuerdo con la norma INEN NTE 866 (2011).

### 4.2. Análisis Granulométrico del árido fino

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INEN NTE 696 (2011), las arenas ensayadas presentaron un módulo de finura de 1,97 en la Mina RU situándose fuera del rango establecido y un valor de 2,83 en la mina RM situándose dentro del rango establecido, en la norma INEN NTE 872 (2011), la cual nos dice que el módulo de finura no debe ser inferior a 2,3 ni superior 3,1.

El árido fino de la mina RM es válido para la elaboración de morteros y el árido fino de la mina RU al no cumplir con el rango establecido, la norma INEN NTE 872 (2011) nos dice que este árido puede ser aceptado siempre y cuando se pueda demostrar que sus

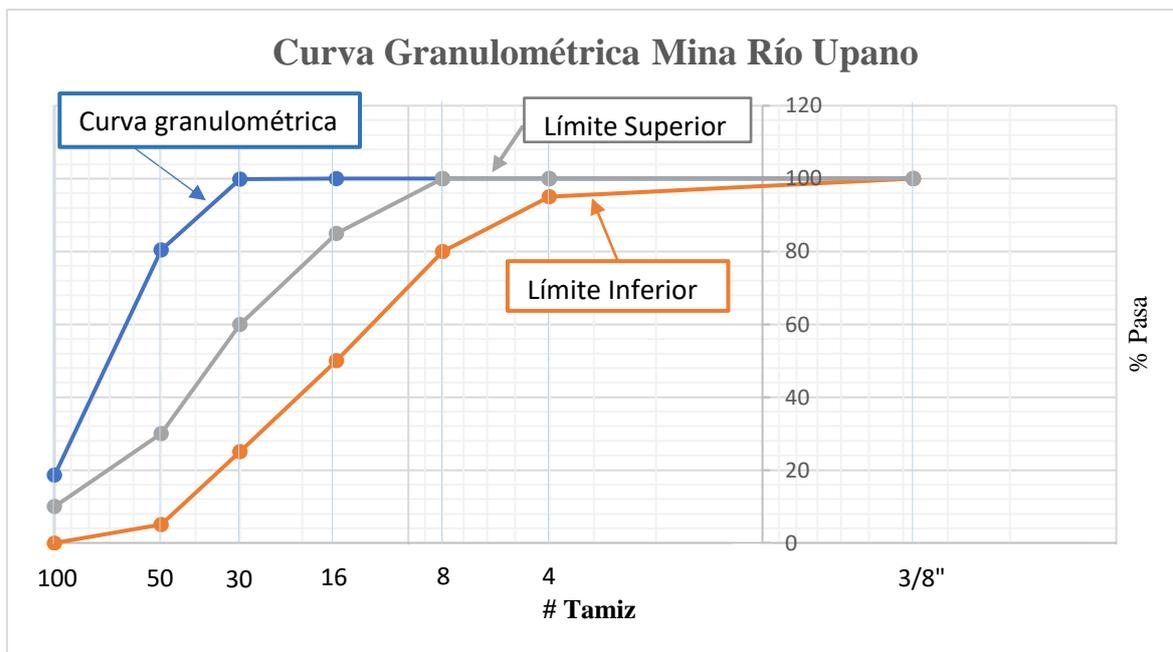
propiedades relevantes sean al menos iguales a las de un hormigón (en este caso mortero) con los mismos ingredientes.

Cabe destacar que este ensayo se llevó a cabo con el objetivo de conocer la composición de los áridos, con el fin de identificar rápidamente si estas arenas presentan un exceso de fracciones gruesas o finas. Estos áridos serán utilizados para elaborar morteros imprimibles, y nuestro enfoque principal se centrará en el análisis de resistencias y características del mortero imprimible. Por lo tanto, no es estrictamente necesario que cumpla con la faja granulométrica, ya que no estamos elaborando un hormigón, el cual requiere cumplir con las normas de calidad de los materiales.

En la Tabla 7 se observa el pasante y el retenido en cada tamiz ordenado descendientemente para el árido fino de la mina RU donde en el tamiz N° 16,30,50 y 100 el porcentaje que pasa supera los límites superiores del rango establecido en la norma INEN NTE 872 (2011), para cada tamiz, indicándonos un exceso de finos. Para una mejor comprensión de lo explicado se puede visualizar la Figura 11.

**Tabla 7.-** Análisis Granulométrico del árido fino de la mina RU.

N° de Tamiz	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	Porcentaje que pasa especificado árido fino norma INEN 872	
<b>3/8"</b>	0	0	100	100	100
<b>4</b>	0	0	100	95	100
<b>8</b>	0	0	100	80	100
<b>16</b>	0	0	100	50	85
<b>30</b>	0,16	0,16	99,84	25	60
<b>50</b>	19,38	19,54	80,46	5	30
<b>100</b>	61,77	81,31	18,69	0	10
<b>200</b>	14,82	96,12	3,88		
Bandeja	3,88	100	0		
<b>Módulo de Finura</b>		1,97			



**Figura 11.-** Curva Granulométrica mina RU.

En la Tabla 8 se observa el pasante y el retenido en cada tamiz ordenado descendientemente para el árido fino de la mina RM donde en el tamiz N° 16 y 30 el porcentaje que pasa supera los límites superiores del rango establecido en la norma INEN NTE 872 (2011), para cada tamiz, indicándonos un exceso de finos. Para una mejor comprensión de lo explicado se puede visualizar la Figura 12.

**Tabla 8.-** Análisis Granulométrico del árido fino de la mina RM.

N° de Tamiz	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	Porcentaje que pasa especificado árido fino norma INEN 872	
3/8''	0	0	100	100	100
4	0	0	100	95	100
8	0	0	100	80	100
16	0	0	100	50	85
30	3,02	3,02	96,98	25	60
50	78,23	81,25	18,75	5	30
100	17,31	98,56	1,44	0	10
200	1,16	99,72	0,28		
Bandeja	0,28	100	0		
<b>Módulo De Finura</b>		<b>2,83</b>			

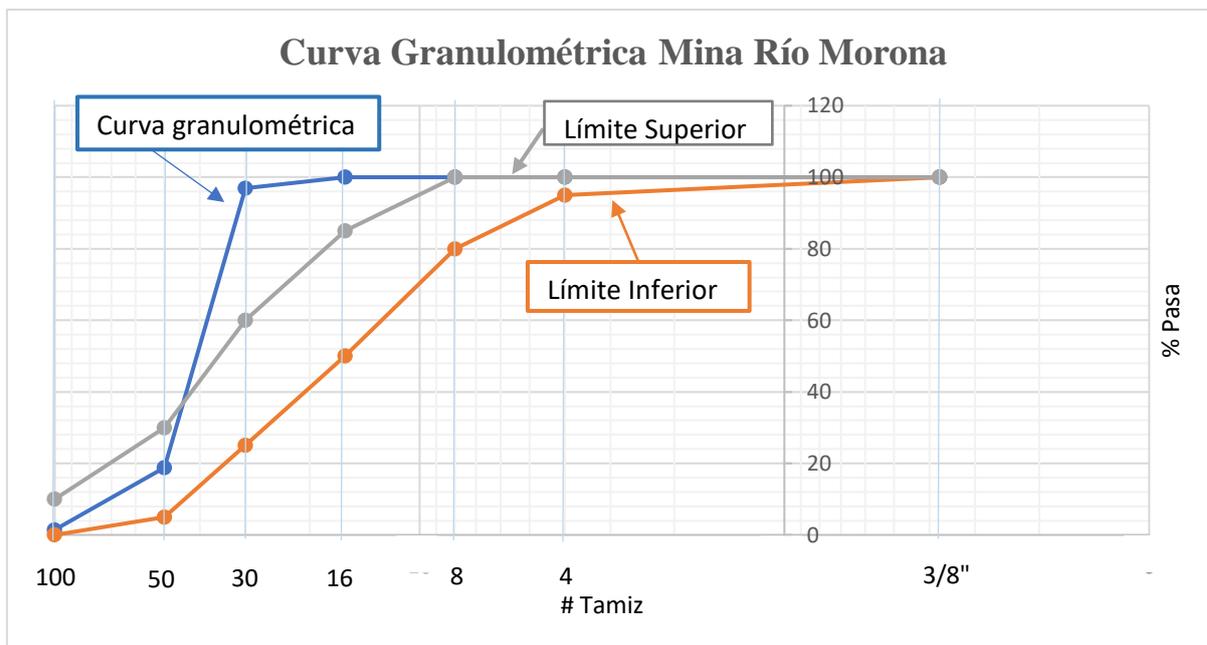


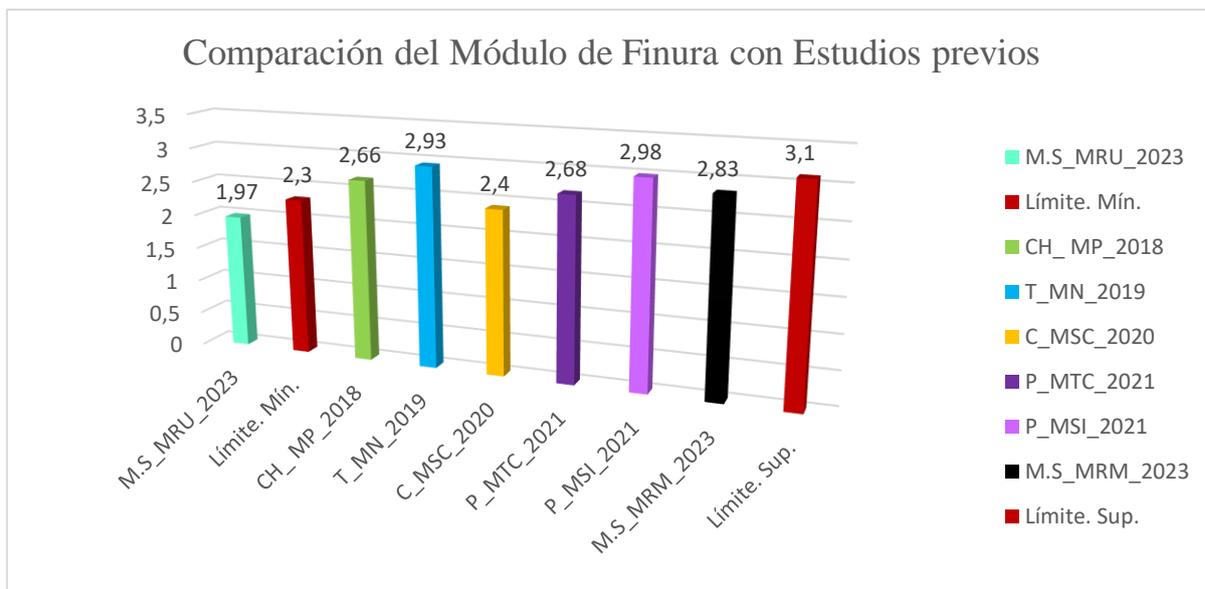
Figura 12.- Curva Granulométrica mina RM.

En la Tabla 9 se presenta la nueva nomenclatura que se utilizará de aquí en adelante, para las gráficas que nos muestran la comparación de las investigaciones previas con la realizada actualmente.

Tabla 9.-Nueva nomenclatura a utilizar en gráficas de comparación.

Provincia_Mina	Nomenclatura	Referencia
Chimborazo_Mina Penipe	CH_MP_2018	(Mariño, 2018)
Tungurahua_Mina Nieto	T_MN_2019	(Taco, 2019)
Cotopaxi_Mina Segundo Chacón	C_MSC_2020	(Llerena, 2020)
Pastaza_Mina Trópico de Capricornio	P_MTC_2021	(Vallejo, 2021)
Pastaza_Mina Santa Isabel	P_MSI_2021	(Vallejo, 2021)
Morona Santiago_Mina Río Morona	M.S_MRM_2023	(Arteaga y Lascano, 2023)
Morona Santiago_Mina Río Upano	M.S_MRU_2023	(Arteaga y Lascano, 2023)

En la Figura 13 se presenta una comparación de los módulos de finura de las minas RU y RM pertenecientes a la provincia de Morona Santiago y de las investigaciones previas realizadas en las provincias de Chimborazo (2018), Tungurahua (2019), Cotopaxi (2020), Pastaza (2022), además se agregó los límites que nos permite la norma (INEN NTE 872, 2011) para una mejor comprensión.



**Figura 13.-** Comparación del módulo de finura con estudios previos y la norma.

En la Figura 13 se puede evidenciar que el árido de la mina RU correspondiente a la provincia de Morona Santiago tiene los granos más finos con respecto a los estudios realizados anteriormente y lo permitido en la norma (INEN NTE 872, 2011) mientras que el árido de mina RM tiene granos más finos que Tungurahua y Pastaza (mina Santa Isabel) pero encontrándose dentro del rango permitido. Estos resultados no son suficientes para garantizar que las arenas estudiadas van a hacer la menos o la más conveniente para ser usadas en los morteros, porque se debe tomar en cuenta las demás propiedades y características mencionadas en la presente investigación.

#### 4.3. Contenido total de humedad

Se utilizó la norma INEN NTE 862 para realizar la prueba de contenido de humedad, resultando para la mina RU un porcentaje promedio de 13,81 y para la mina RM un porcentaje promedio de 11,71, estos se pueden visualizar en la Tabla 10 y Tabla 11 respectivamente. Estos resultados son muy significativos y se deberá tener muy presente en la relación agua- cemento.

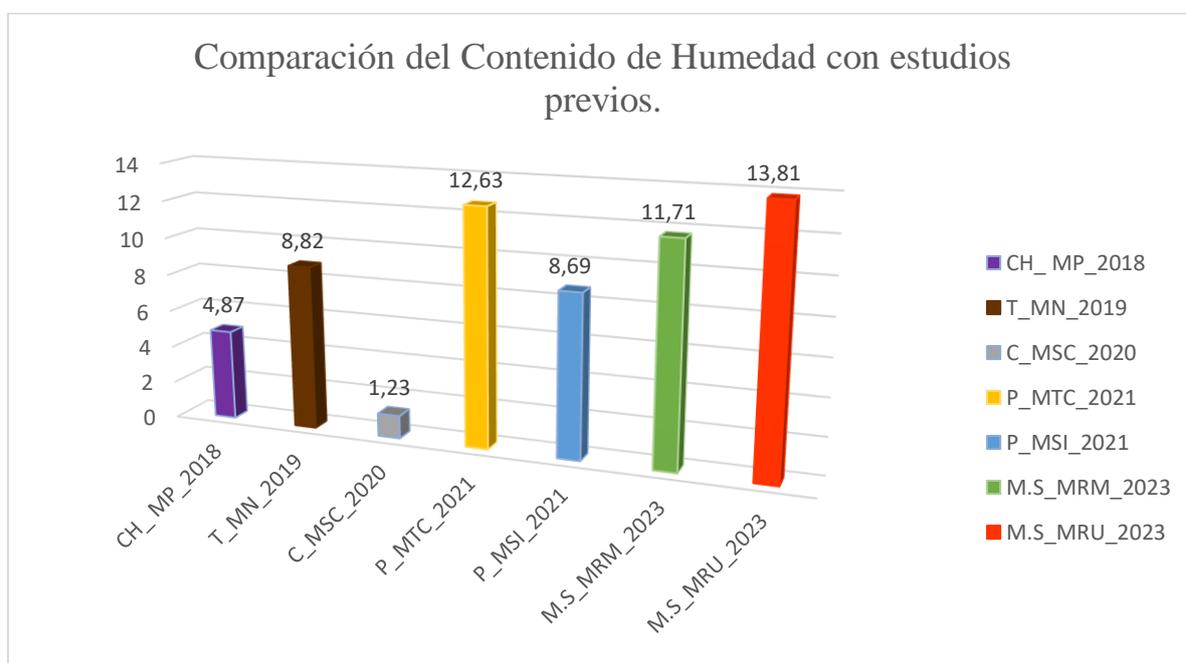
**Tabla 10.-** Contenido de humedad de la mina RU.

Tara	Masa de la Tara (g)	Tara + árido húmedo (g)	Tara + árido Seco (g)	Masa árido húmedo (g)	Masa árido seco (g)	Cont. Humedad %
Tara 1	31,24	83,01	76,58	51,77	45,34	14,18
Tara 2	31,13	85,00	78,56	53,87	47,43	13,58
Tara 3	31,43	85,82	79,23	54,39	47,8	13,79
Tara 4	31,51	86,45	79,61	54,94	48,1	14,22
Tara 5	31,31	84,86	78,58	53,55	47,27	13,29
<b>% Humedad Promedio</b>						<b>13,81</b>

**Tabla 11.-** Contenido de humedad de la mina RM.

<b>Tara</b>	<b>Masa de la Tara (g)</b>	<b>Tara + árido húmedo (g)</b>	<b>Tara + árido Seco (g)</b>	<b>Masa árido húmedo (g)</b>	<b>Masa árido seco (g)</b>	<b>Cont. Humedad %</b>
Tara 1	6,82	57,78	52,25	50,96	45,43	12,17
Tara 2	6,8	58,42	52,56	51,62	45,76	12,81
Tara 3	6,85	57,6	52,1	50,75	45,25	12,15
Tara 4	6,98	59,09	54,08	52,11	47,1	10,64
Tara 5	6,48	59,15	54,03	52,67	47,55	10,77
<b>% Humedad Promedio</b>						<b>11,71</b>

En la Figura 14 se presenta una comparación del contenido de humedad de las minas RU y RM pertenecientes a la provincia de Morona Santiago y de las investigaciones previas realizadas en las provincias de Chimborazo (2018), Tungurahua (2019), Cotopaxi (2020), Pastaza (2022).



**Figura 14.-** Comparación del contenido total de humedad con investigaciones previas.

Al cotejar los hallazgos anteriores con los estudiados se puede observar en la Figura 14 que la mina RU presenta mayor porcentaje promedio de humedad, continuando la mina estudiada por (Vallejo, 2021) de la provincia de Pastaza TC y ubicándose en tercer lugar la mina RM. Los tres áridos presentaron un alto contenido de humedad, por lo que para futuros morteros se debe tener mucho cuidado con la relación agua- cemento, ya que esta determina la calidad y resistencia final del mortero, se debe tener en cuenta que la humedad influye en el peso del árido y se debe restar o sumar en el agua añadida al elaborar la dosificación. Se

debe tener presente que en esta investigación se trabajó con una dosificación determinada por Mariño (2018), para continuar con la línea de investigación.

#### 4.4. Determinación de la Densidad y Porcentaje de Absorción

En la Tabla 12 y Tabla 13 se presentan los resultados del ensayo, los cuales nos indica que en la densidad SH se tiene valores menores debido a que el árido no tiene agua absorbida ni libre, por otro lado, los poros de la densidad SSS se encuentran llenos de agua, pero tampoco existe exceso de agua en la superficie. La mina RU presenta valores mayores de densidad debido a que sus partículas son más finas, lo cual hace que tenga una mayor compactación y menos espacio de vacíos.

La arena de la mina RU absorbe solo el 1,38% de agua, mientras que la arena de la mina RM muestra una absorción del 4,08%. Esto indica que la arena de la mina RM tiene una mayor capacidad para retener agua en comparación con la arena de la mina RU. Estas diferencias en la capacidad de absorción pueden deberse a las características y composición mineralógica únicas de cada mina.

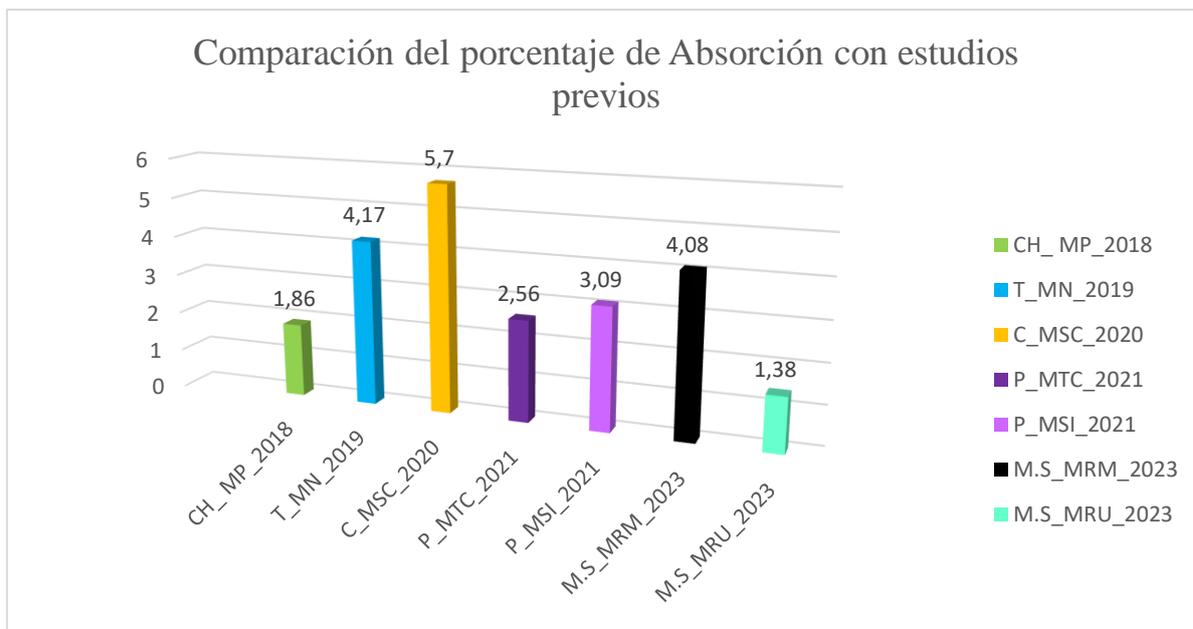
**Tabla 12.-** Densidad y Porcentaje de absorción mina RU.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad SH ( $Kg/cm^3$ )	2663,15
Densidad en SSS ( $Kg/cm^3$ )	2700,03
Densidad Aparente ( $Kg/cm^3$ )	2765,40
Porcentaje de Absorción (%)	1,38

**Tabla 13.-** Densidad y Porcentaje de absorción mina RM.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad SH ( $Kg/cm^3$ )	2458,57
Densidad en SSS ( $Kg/cm^3$ )	2558,76
Densidad Aparente ( $Kg/cm^3$ )	2733,10
Porcentaje de Absorción (%)	4,08

En la Figura 15 se coteja el porcentaje de absorción de las minas RU y RM pertenecientes a la provincia de Morona Santiago y de las investigaciones previas realizadas en las provincias de Chimborazo (2018), Tungurahua (2019), Cotopaxi (2020), Pastaza (2022).



**Figura 15.-** Comparación del porcentaje de absorción con estudios previos.

En la Figura 15 se puede observar que el árido de la provincia de Cotopaxi estudiado por (Llerena, 2020) presenta la mayor capacidad de absorción, con un porcentaje de 5,7%. Por otro lado, la mina RU muestra la menor capacidad de absorción, con un porcentaje de 1,38%. Por lo tanto, la arena que absorbe un 5,7% requerirá una mayor cantidad de agua para alcanzar una humedad específica en comparación con la arena que absorbe un 1,38%. Estas diferencias en los porcentajes de absorción se deben a las diferentes características y composiciones de las arenas.

#### 4.5. Resumen de Resultados árido fino

En la Tabla 14 y Tabla 15 se presenta los resultados resumidos de las propiedades físicas de las arenas estudiadas en esta investigación, las cuales fueron realizadas en el laboratorio del Ing. Víctor Llanga y el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Chimborazo.

**Tabla 14.-** Resumen de ensayos de las propiedades físicas de la mina RU.

<b>Cualidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Materia Orgánica	1	-
Módulo Granulométrico	1,97	-
Contenido de Humedad	13,81	%
Densidad SSS	2700,03	kg/cm <sup>3</sup>
% Absorción	1,38	%

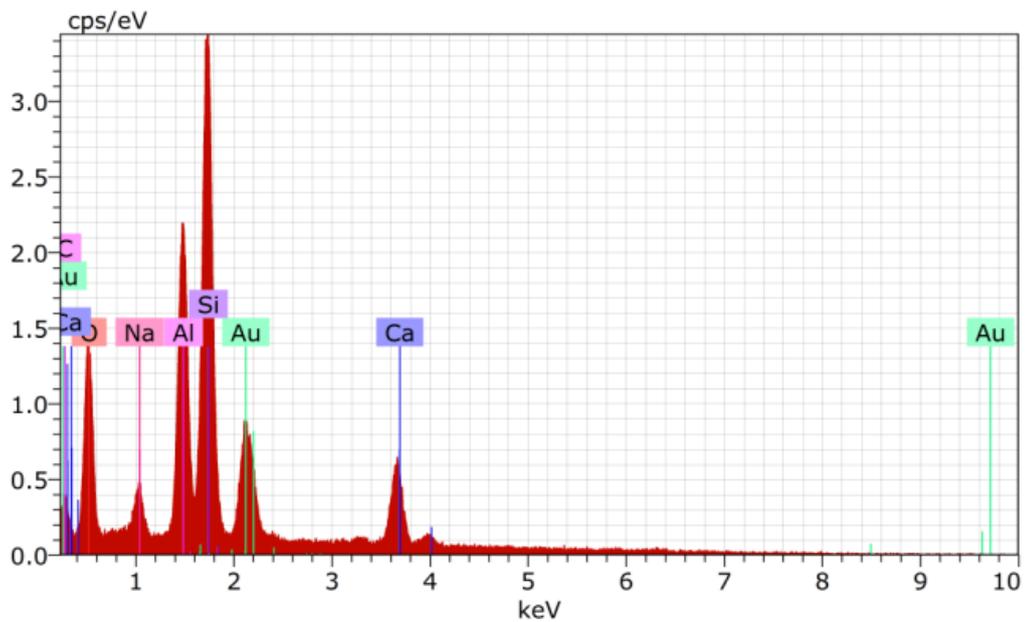
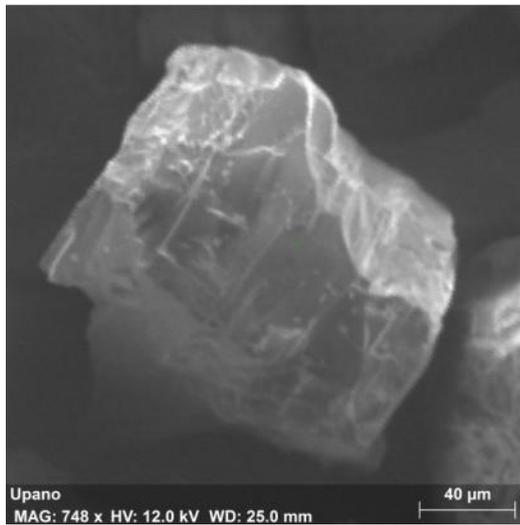
**Tabla 15.-** Resumen de ensayos de las propiedades físicas de la mina RM.

<b>Cualidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Materia Orgánica	2	-
Módulo Granulométrico	2,83	-
Contenido de humedad	11,71	%
Densidad SSS	2558,76	kg/cm <sup>3</sup>
% Absorción	4,08	%

Al analizar los resultados se puede decir que el árido mostrado en la Tabla 14 perteneciente a la mina RU no cumple el parámetro de módulo de finura indicado en la Norma INEN 872, pero no es suficiente para rechazar este árido, por lo que se debe tomar en cuenta las demás propiedades y características que presente. Mientras que el árido mostrado en la Tabla 15 de la mina RM sí cumple con los límites establecidos en las normas INEN. Cabe recalcar que las propiedades físicas de los áridos de las provincias estudiadas del Ecuador se diferencian por razones climáticas, ambientales, topográficas y su ubicación.

#### **4.6. Análisis Químico del árido fino**

El análisis químico de las arenas RU y RM fueron realizadas en el laboratorio de Microscopia Electrónica de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) por el PhD. Víctor J García y el Ing. Jonathan Orozco, ellos nos proporcionaron las micrografías y el análisis de espectroscopía de fotoelectrones de rayos X dispersado.

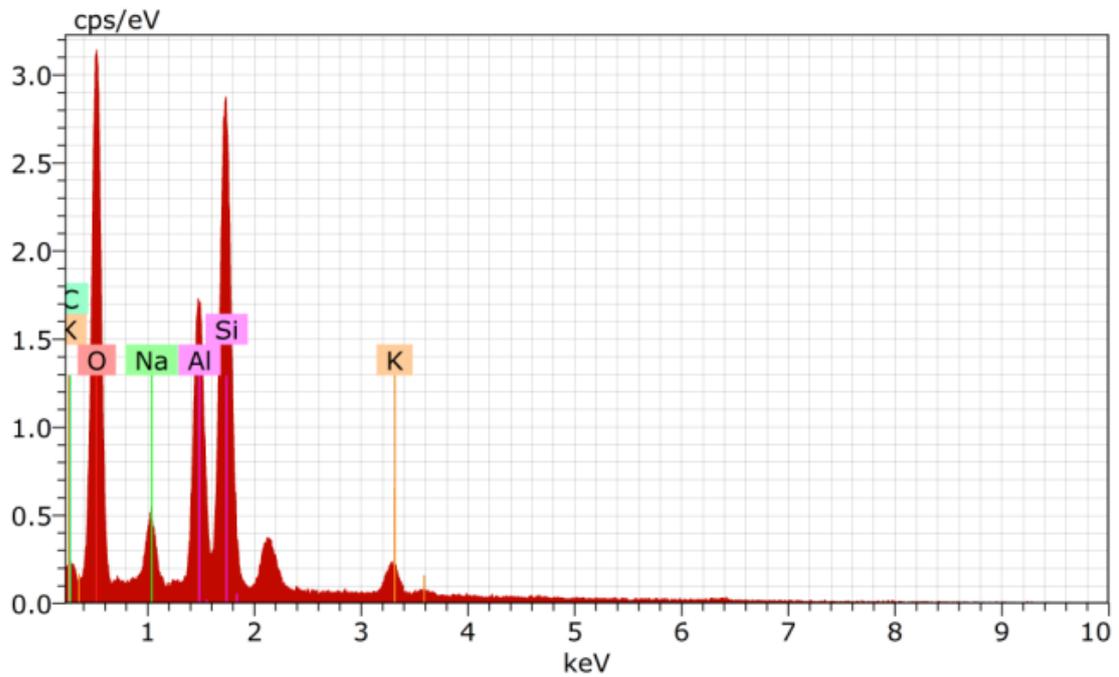
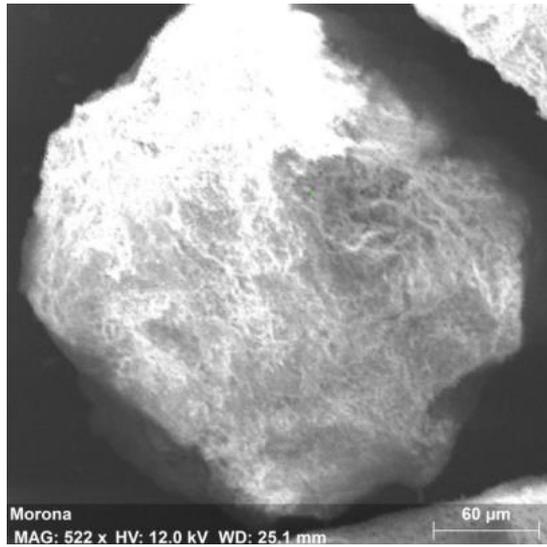


Spectrum: 120919 450

El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error (1 Sigma) [wt. %]
Si	14	K-series	19.66	29.23	28.89	0.84
O	8	K-series	16.31	24.25	42.07	2.10
Au	79	M-series	12.05	17.92	2.52	0.49
Al	13	K-series	9.01	13.40	13.78	0.44
Ca	20	K-series	8.51	12.65	8.76	0.30
Na	11	K-series	1.17	1.74	2.10	0.10
C	6	K-series	0.55	0.81	1.88	0.20
Total:			67.25	100.00	100.00	

Figura 16.- Observación química del agregado fino de la mina RU.

Fuente. - Laboratorio microscopía UNACH.



Spectrum: 120919 453

El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error (1 Sigma) [wt. %]
O	8	K-series	34.67	51.63	63.76	4.06
Si	14	K-series	18.35	27.34	19.23	0.78
Al	13	K-series	8.26	12.30	9.00	0.40
Na	11	K-series	2.28	3.40	2.92	0.17
K	19	K-series	2.17	3.24	1.64	0.10
C	6	K-series	1.41	2.10	3.45	0.37

Total: 67.14 100.00 100.00

**Figura 17.-** Observación química del agregado fino de la mina RM.

**Fuente.** - Laboratorio microscopía UNACH.

Se puede observar que los áridos estudiados presentan altos porcentajes de silicio, lo cual incrementa la resistencia de los morteros significativamente debido a que sus pequeñas partículas llenan los espacios vacíos en la pasta lo que conlleva una mayor adherencia y compacidad, también reduce la exudación de agua en la superficie y reduce la permeabilidad, de acuerdo con la Figura 16 y Figura 17 la mina RU posee un mayor porcentaje de silicio en su composición con respecto a la mina RM por lo que tiene un punto a favor en la resistencia, sin embargo, se deberá evaluar todos los parámetros de los ensayos anteriormente mencionados para sus resistencias finales.

En la Figura 16 y Figura 17 se observa la forma que tienen las arenas de río y su particularidad es que tienen una forma angulosa, lo cual es de gran ayuda al realizar la mezcla, ya que contribuye con una buena adherencia de los materiales. En el Anexo 5 y Anexo 6 se puede evidenciar el tamaño de las arenas.

#### 4.7. Efectos ensayo a compresión a edades tempranas

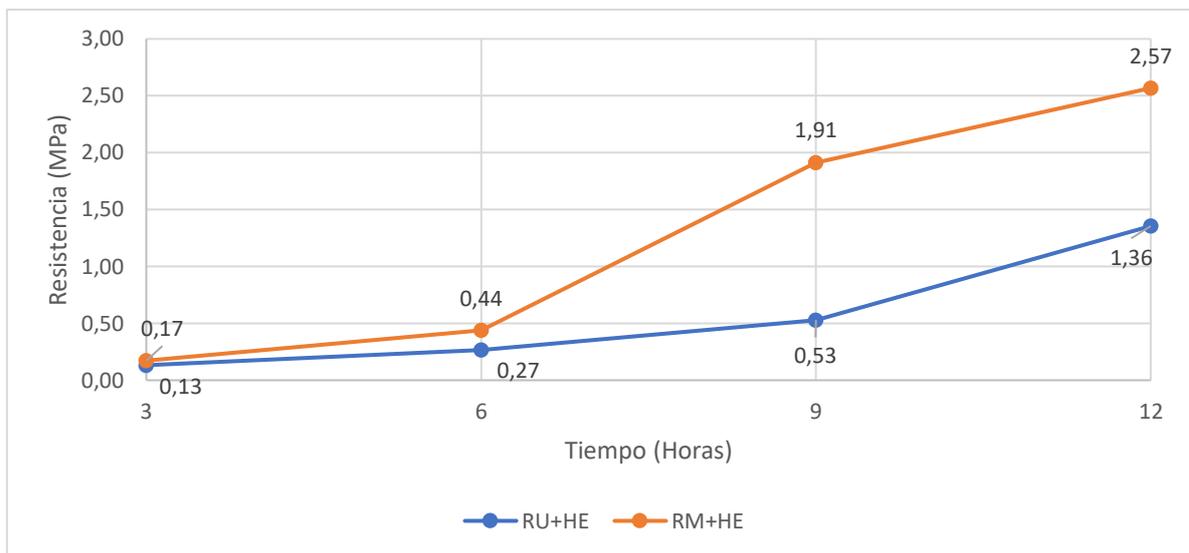
En la Tabla 16 se presentan los efectos del ensayo a compresión de las probetas realizadas con los áridos estudiados, se ensayaron a edades tempranas de 3, 6, 9 y 12 horas, calculando la resistencia promedio y la desviación estándar.

**Tabla 16.-** Análisis Estadístico del ensayo a compresión a corto plazo mina RU y RM.

Horas	Medida	Dosificación	
		RU+HE	RM+HE
3	Media (MPa)	0,133	0,172
	Desviación	0,023	0,023
6	Media (MPa)	0,265	0,437
	Desviación	0,023	0,041
9	Media (MPa)	0,530	1,913
	Desviación	0,090	0,125
12	Media (MPa)	1,355	2,568
	Desviación	0,108	0,162

Al analizar la Tabla 16 se demuestra que el mortero trabajado con el agregado de la mina RM presentó mayores resistencias en todas las edades con respecto a la mina RU. Esto debido a que la mina RM obtuvo un menor tiempo de fraguado tanto inicial como final por ende la probeta mostrara una consistencia más sólida.

En la Figura 18 se muestra la comparación de las resistencias a corto plazo de las dos minas estudiadas a tempranas edades.



**Figura 18.-** Comparación de Edades vs Resistencia a corto plazo de las minas RU y RM.

#### 4.8. Efectos ensayo a compresión a largo plazo

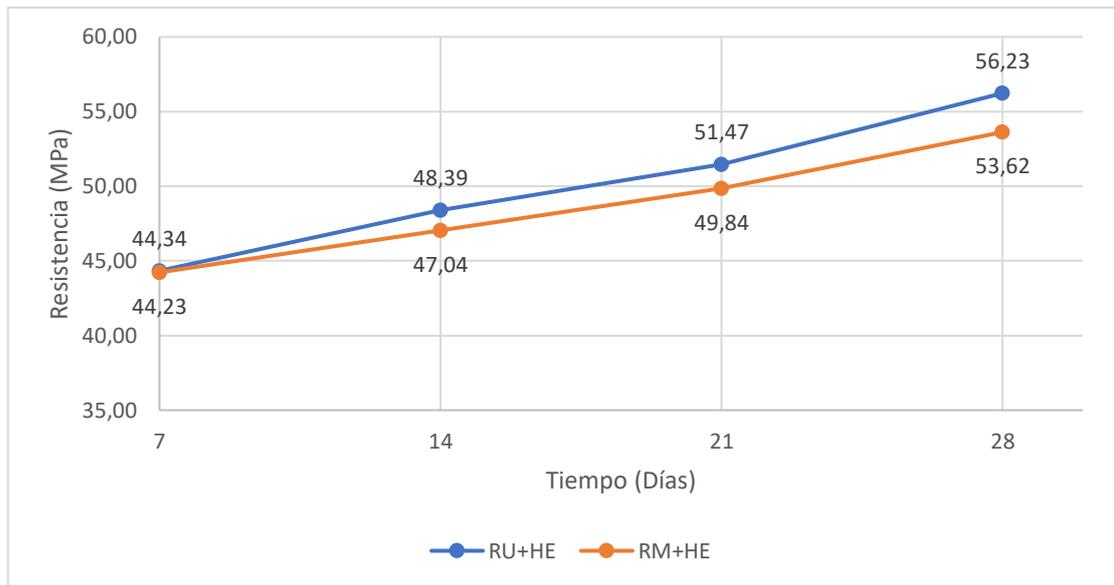
En la Tabla 17 se muestra los efectos del ensayo a compresión de las probetas realizadas con los áridos estudiados, se ensayaron a edades de 7, 14, 21 y 28 días, calculando la resistencia promedio y la desviación estándar.

**Tabla 17.-** Análisis Estadístico del ensayo a compresión a largo plazo mina RU y RM

Días	Medida	Dosificación	
		RU+HE	RM+HE
7	Media (MPa)	44,335	44,229
	Desviación	1,969	1,351
14	Media (MPa)	48,387	47,040
	Desviación	1,538	2,684
21	Media (MPa)	51,471	49,844
	Desviación	2,984	1,725
28	Media (MPa)	56,227	53,624
	Desviación	1,624	1,095

En la Tabla 17 se observa que las probetas ensayadas a los 7,14,21 y 28 días presentan mayor resistencia las elaboradas con la arena de la mina RU, esto podría darse a que esta presenta un alto contenido de silicio y según Osorio Anaya et al. (2018), ayuda a mejorar las resistencias gracias a sus propiedades puzolánicas. Además, su finura contribuye al aumento de la densidad del mortero y fortalece la estructura de la mezcla.

Se puede visualizar en la Figura 19 una comparación del comportamiento de las probetas realizadas con las minas RU y RM.



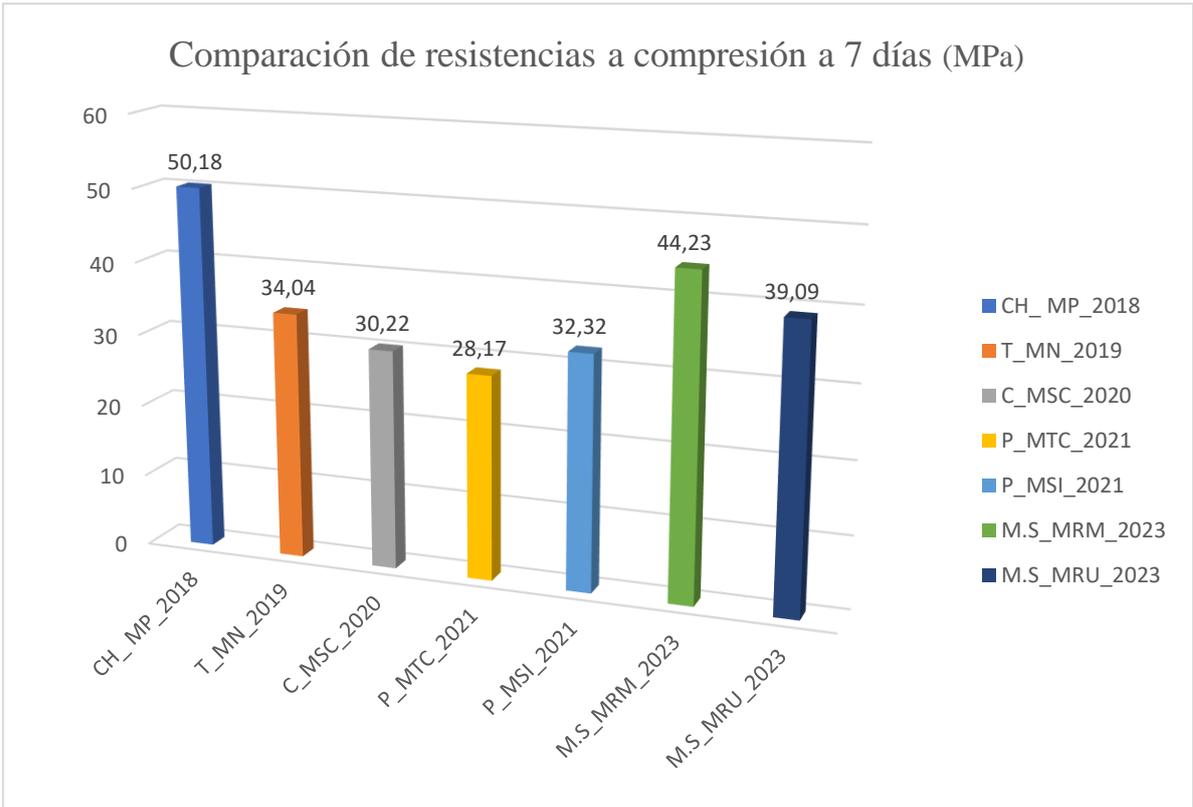
**Figura 19.-** Comparación de Días vs Resistencia a largo plazo de las minas RU y RM.

#### **4.9. Comparación del ensayo a compresión a largo plazo de las minas RU y RM con anteriores provincias estudiadas.**

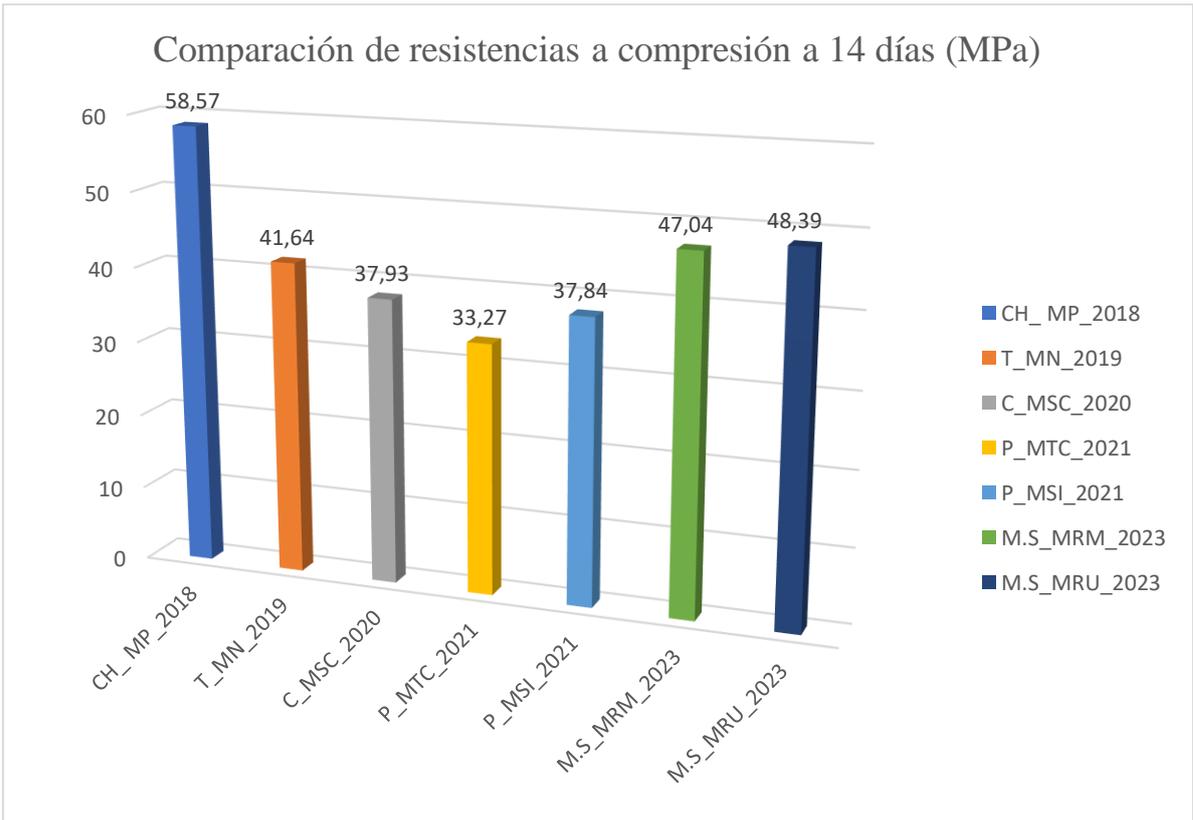
Se presenta una comparación con tesis anteriores realizadas por (Mariño, 2018), (Taco, 2019), (Llerena, 2020) y (Vallejo, 2021) autores que realizaron dosificaciones adicionando cal hidráulica y flujo piroclástico, los cuales no aportaron ningún beneficio en la resistencia del mortero por tal razón en esta comparación se hizo la recopilación de los estudios anteriores solo de la dosificación de árido más el cemento Tipo HE, ya que esta siempre otorga mejores resistencias en los estudios previos.

En la Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23 se evidencia las resistencias a 7,14,21 y 28 días respectivamente, donde el mortero de la provincia de Chimborazo elaborado por Mariño (2018), sobresale de los demás morteros por su mejor resistencia, continuando con las mezclas elaboradas con los áridos de las minas RU y RM las cuales también presentaron buenas resistencias.

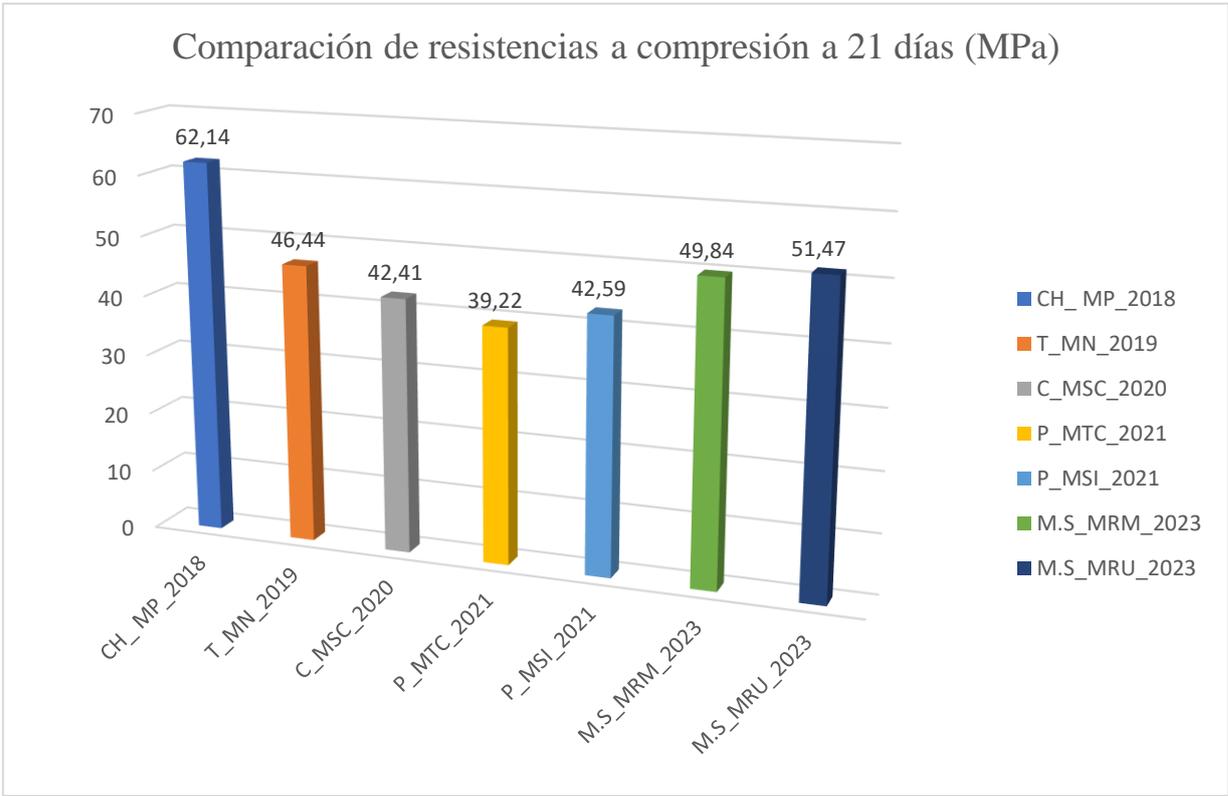
Los morteros que presentan menores resistencias fueron de las provincias de Cotopaxi realizado por (Llerena, 2020) y la provincia de Pastaza mina Trópico de Capricornio (TC) realizado por (Vallejo, 2021).



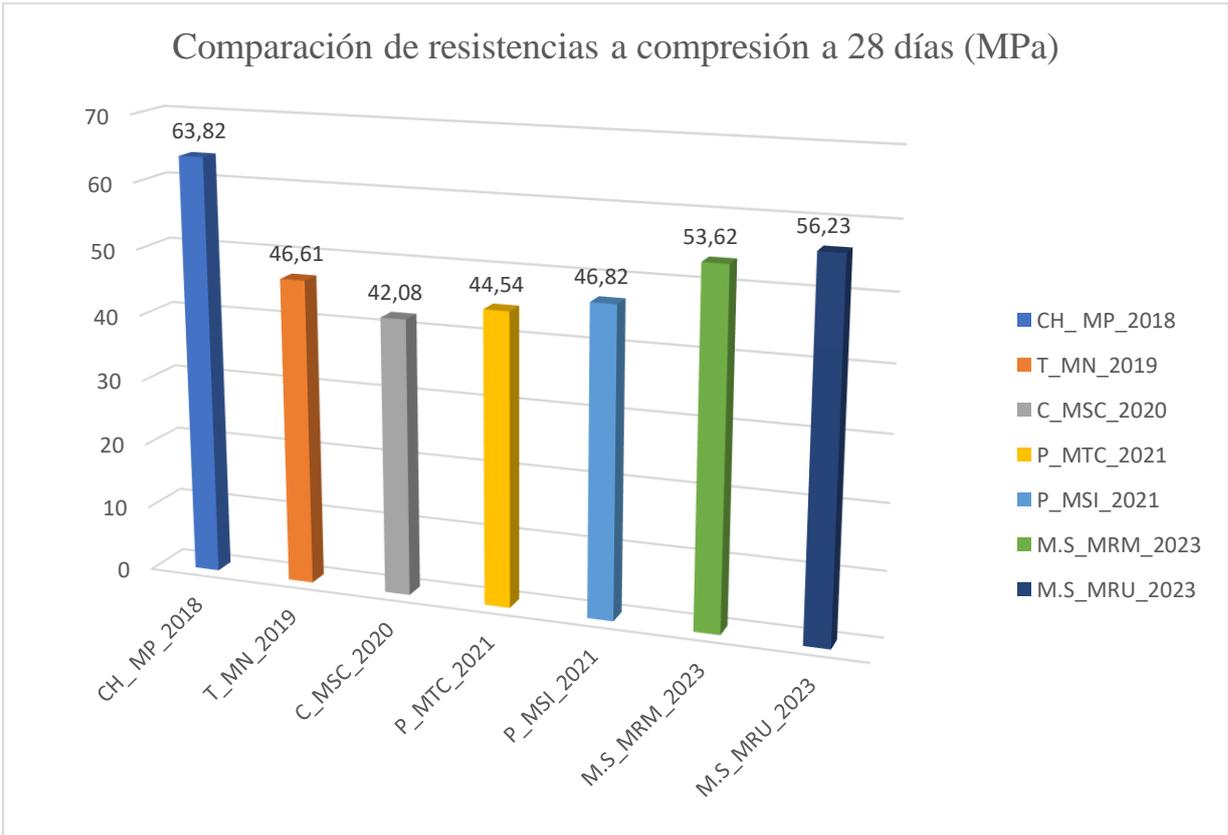
**Figura 20.-** Comparación de resistencias a compresión a 7 días con estudios previos.



**Figura 21.-** Comparación de resistencias a compresión a 14 días con estudios previos.



**Figura 22.-** Comparación de resistencias a compresión a 21 días con estudios previos.



**Figura 23.-** Comparación de resistencias a compresión a 28 días con estudios previos.

#### 4.10. Ensayo de consistencia

Este ensayo es usado para determinar la consistencia normal o la cantidad de agua requerida para que los morteros alcancen una fluidez óptima y una plasticidad ideal. Pero nosotros al tener una dosificación establecida con este ensayo se quiere conocer en que consistencia se encuentran los morteros, ya que, la norma INEN NTE 157 (2011), dice que una mezcla tiene una consistencia normal dado que la varilla penetre  $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$  debajo la superficie original.

En la Tabla 18 se puede observar que el mortero elaborado con la mina RU obtuvo una penetración promedio de 0,86 cm, resultando que la mezcla se encuentra seca y que se requiere un cambio de dosificación para tener una buena trabajabilidad en la impresión 3D.

**Tabla 18.-** Consistencia de la mina RU.

Tiempo (seg)	Penetración (cm)
30	0,90
30	0,85
30	0,90
30	0,80
Promedio	0,86

En la Tabla 19 se puede observar que el mortero elaborado con la mina RM obtuvo una penetración promedio de 0,95 cm encontrándose dentro del rango admisible para que la mezcla tenga una consistencia normal.

**Tabla 19.-** Consistencia de la mina RM.

Tiempo (seg)	Penetración (cm)
30	0,95
30	1.00
30	0,95
30	0,90
Promedio	0,95

#### 4.11. Ensayo de Fluidez

La fluidez determina la manejabilidad de una mezcla, según la norma INEN NTE 2502 (2009), esta deberá estar entre  $110 \pm 5$ . Según la Tabla 20 se indica rangos de acuerdo con el porcentaje de fluidez para morteros, de acuerdo con el tipo de su configuración y ocupación.

**Tabla 20.-** Fluidez recomendada para el mortero según algunos tipos de estructuras.

<b>Consistencia</b>	<b>Fluidez %</b>	<b>Condición de colocación</b>	<b>Tipos de estructura</b>	<b>Sistema de Colocación</b>
Dura (Seca)	80-100	Necesidad de vibración	Arreglos, revestimientos de túneles, cimentaciones, contrapisos.	Necesidad de vibración.
Media (plástica)	100-120	No necesita vibración	Pegado de calicanto, cerámica	De manera manual
Fluida (húmeda)	120-150	No necesita vibración	Rebutir de mampostería estructural, morteros nivelantes para contrapisos.	De manera manual o bombeando

**Fuente:** Adaptado de (Llerena, 2020)

En la Tabla 21 se presenta el porcentaje de fluidez de la mina RU y la mina RM realizados a una temperatura de 19°C y una humedad relativa de 54%.

**Tabla 21.-** Fluidez de los morteros realizados con los áridos de las minas RU y RM.

<b>Dosificación</b>	<b>% Fluidez</b>
RU+HE	90,3
RM+HE	107,00

En la Tabla 21 se evidencia que la mina RU se encuentra fuera del rango establecido en la norma siendo una mezcla dura (seca), por otro lado, la mina RM cumple con el rango establecido siendo una mezcla media (plástica).

#### **4.12. Determinación del inicio y final de fraguado**

En la Tabla 22 se presenta los tiempos inicial y final de fraguado de los áridos de las minas RU y RM realizados por el método de Vicat.

**Tabla 22.-** Tiempo de fraguado de los morteros realizados con los áridos de las minas RU y RM.

<b>Dosificación</b>	<b>Tiempo fraguado inicial (min)</b>	<b>Tiempo fraguado final (min)</b>
RU+HE	257	482
RM+HE	185	380

En la Tabla 22 al comparar las dosificaciones de las minas se puede deducir que la mina RM tiene una diferencia considerable de tiempo de fraguado con respecto a la mina RU, en consecuencia, los ensayos de compresión a corto plazo tendrán mayores resistencias.

### 4.13. Impresión 3D

#### 4.13.1. Condiciones externas de los ensayos

En promedio, se tomaron 23 mediciones continuas a intervalos de 10 segundos de temperatura y humedad ambiente en las distintas impresiones, en la Tabla 23 se observa que la probeta con forma de triángulo de la dosificación RM + HE se trabajó con una temperatura mayor y una humedad ambiente menor. También los valores de desviación estándar son bajos para los dos tipos de probetas, además se puede decir que las condiciones externas presentan cambios insignificantes, lo que apunta a cierta estabilidad en los valores.

Tabla 23.- Observación Estadística ensayo de temperatura y humedad.

Modelo		Cuadrado		Triángulo	
		Temperatura °C	Humedad %	Temperatura °C	Humedad %
RU+HE	Media	19,4	45,0	19,6	44,9
	Des. Esta.	0,0915	0,1305	0,1164	0,1460
RM+HE	Media	19,6	44,8	19,8	44,7
	Des. Esta.	0,1302	0,1434	0,1037	0,1302

En la Figura 24 y Figura 25 se presenta como las condiciones externas en cuanto a temperatura y humedad ambiente varió durante la impresión de los morteros elaborados con el árido de la mina RU.

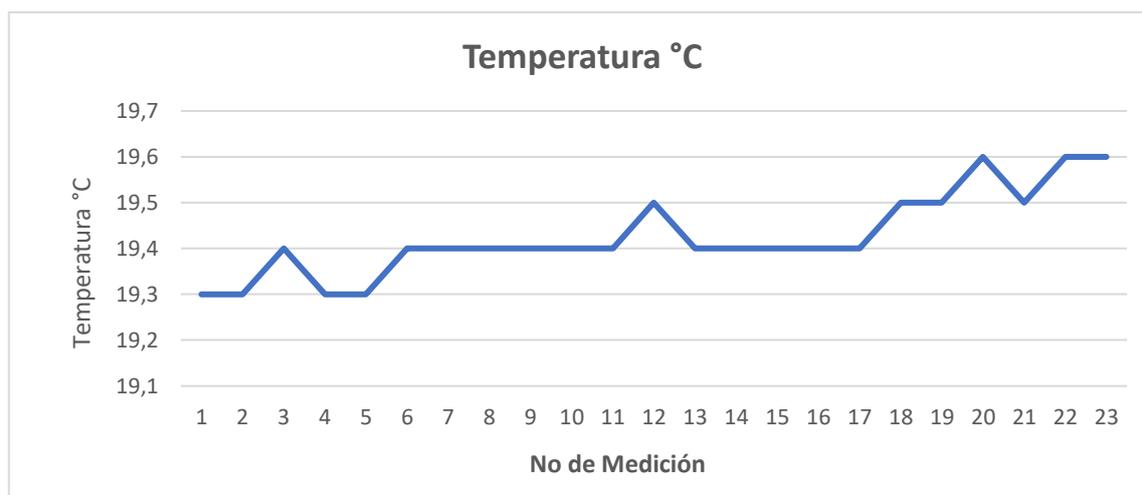
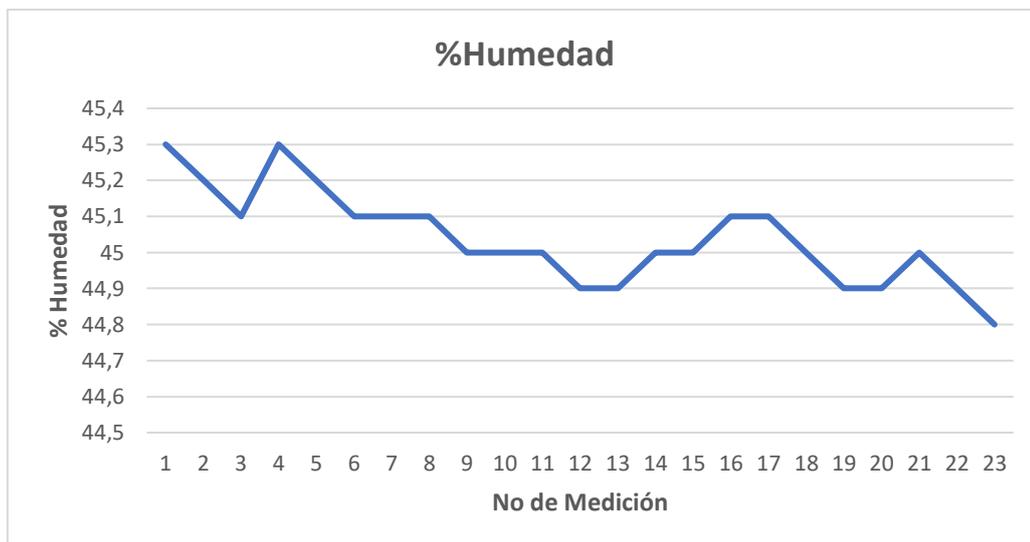


Figura 24.- Temperatura ambiente vs Variación durante la impresión del árido RU.

En la Figura 24, a medida que avanzó el tiempo de la impresión, la variación de temperatura aumento, sin embargo, estas variaciones son positivas, ya que al aumentar la temperatura nos ayuda con el fraguado de la probeta. Pero si esta presenta variaciones muy altas, tenemos una desventaja en la trabajabilidad de la mezcla para la impresión porque se endurece en el extrusor impidiendo el paso de esta.



**Figura 25.-** Humedad ambiente vs variación durante la impresión del árido RU.

En la Figura 25 la humedad desciende en función del tiempo de impresión, sin embargo, las dosificaciones no presentaron escurrimiento y fueron aceptables para la impresión. En caso de tener valores muy bajos de humedad, estos podrían causar problemas con la adherencia o la unión de los elementos, pero ya que se tiene una impresión continua estos problemas se ven reducidos.

#### **4.13.2. Capacidad de bombeo**

Como se mencionó en el capítulo dos, la capacidad de bombeo depende en gran medida de las propiedades de la mezcla, pero también está influenciada por las características del sistema de extrusión como el mecanismo de flujo y la boquilla. En este ensayo nos centramos en las características del material y como resultado, se pudo corregir las dosificaciones, ya que con las que se venía trabajando presentaron mezclas poco fluidas para el prototipo de la impresora 3D.

En la Tabla 24 se presentan las nuevas dosificaciones, con estas se cumplió correctamente con la fluidez de la mezcla y no se obstruyó ni se taponó el extrusor. Cabe recalcar que al imprimir se presenta disminución del flujo, pero esto se controla regulando la velocidad de extrusión y con la alimentación continua del sistema de extrusión. Las probetas impresas por los dos áridos presentan pequeñas fisuras, pero esta condición fue aceptada conforme a lo mencionado por Mechtcherine et al. (2020), que es una cualidad de la extrusión por ocupar una boquilla con tornillo mezclador, al igual que el prototipo utilizado.

**Tabla 24.-** Dosificación y Dosificación corregida para la impresión 3D para un saco de cemento.

	<b>Dosificación</b>		<b>Dosificación corregida impresión 3D</b>	
	<b>RU+HE</b>	<b>RM+HE</b>	<b>RU+HE</b>	<b>RM+HE</b>
<b>Cemento (kg)</b>	50	50	50	50
<b>Arena (kg)</b>	62,25	62,25	62,25	62,25
<b>Agua (kg)</b>	20,75	20,75	20,75	20,75
<b>Sika 161 (kg)</b>	1	1	2,5	2

En la Tabla 24 se observa que se realizó una corrección en la dosificación con relación al plastificante Sika 161. Esto se hizo debido a que un aumento de agua por encima de la cantidad inicialmente diseñada inevitablemente disminuiría la resistencia a compresión. Por lo tanto, se decidió aumentar la cantidad de plastificante, ya que el prototipo de impresora utilizado requiere una mayor manejabilidad y trabajabilidad de la mezcla, características que se logran con este incremento. Además, el aumento de plastificante también proporciona altas resistencias en las primeras etapas del fraguado.

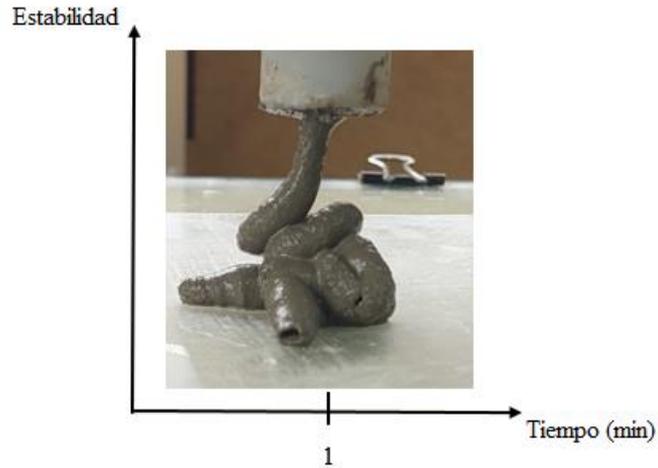
#### **4.13.3. Estabilidad de los morteros**

En este ensayo se determina el tiempo que la mezcla debe estar en reposo, antes de ser impresa, ya que al imprimir al mismo momento que se ponía la mezcla de mortero en el extrusor este se volvía una pasta de mortero sin forma, pero al transcurrir el minuto las mezclas ya se fueron estabilizándose y definiendo una forma como se puede observar en la Figura 26 y Figura 27, cabe recalcar que esta característica fue medida de acuerdo a nuestra percepción óptica.

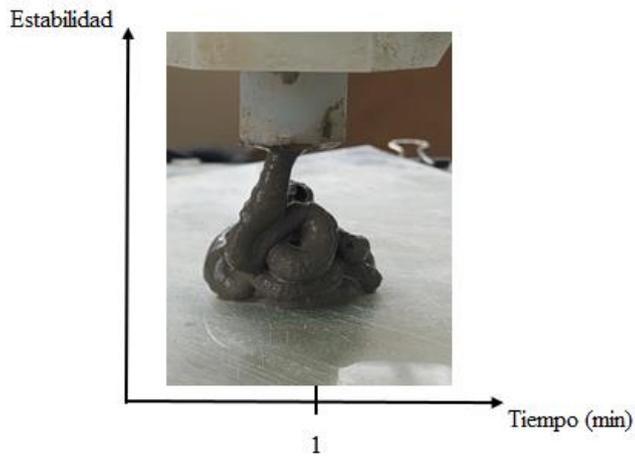
En la Tabla 25 apreciamos que los dos morteros estudiados mostraron una estabilidad óptima al minuto y en la impresión no se presentó obstrucción en el extrusor.

**Tabla 25.-** Estabilidad de los morteros elaborados con los áridos de las minas RU y RM.

<b>Morteros</b>	<b>Tiempo (min)</b>
RU+HE	1
RM+HE	1



**Figura 26.-** Estabilidad de RU+HE vs Tiempo.



**Figura 27.-** Estabilidad de RM+HE vs Tiempo.

En la Figura 26 y Figura 27 se presenta la línea de tiempo, para evidenciar la estabilidad con respecto al tiempo de los morteros estudiados, los dos necesitaron un tiempo de reposo de un minuto dentro del inyector antes de ser utilizado en la impresión. Lo que nos confirma que a mayor aditivo plastificante la mezcla va a tener más estabilidad y menos escurrimiento (Mariño, 2018).

#### 4.13.4. Tiempo trabajable de los morteros

En este ensayo se puede medir el tiempo en el cual el mortero puede ser impreso continuamente sin que se presente cortes en las probetas. En la Tabla 26 se presenta los resultados obtenidos.

**Tabla 26.-** Tiempo trabajable de los morteros.

<b>Modelo:</b>	<b>Cuadrado</b>	<b>Triángulo</b>
Morteros	Tiempo (min)	
RU+HE	7	8
RM+HE	8	9

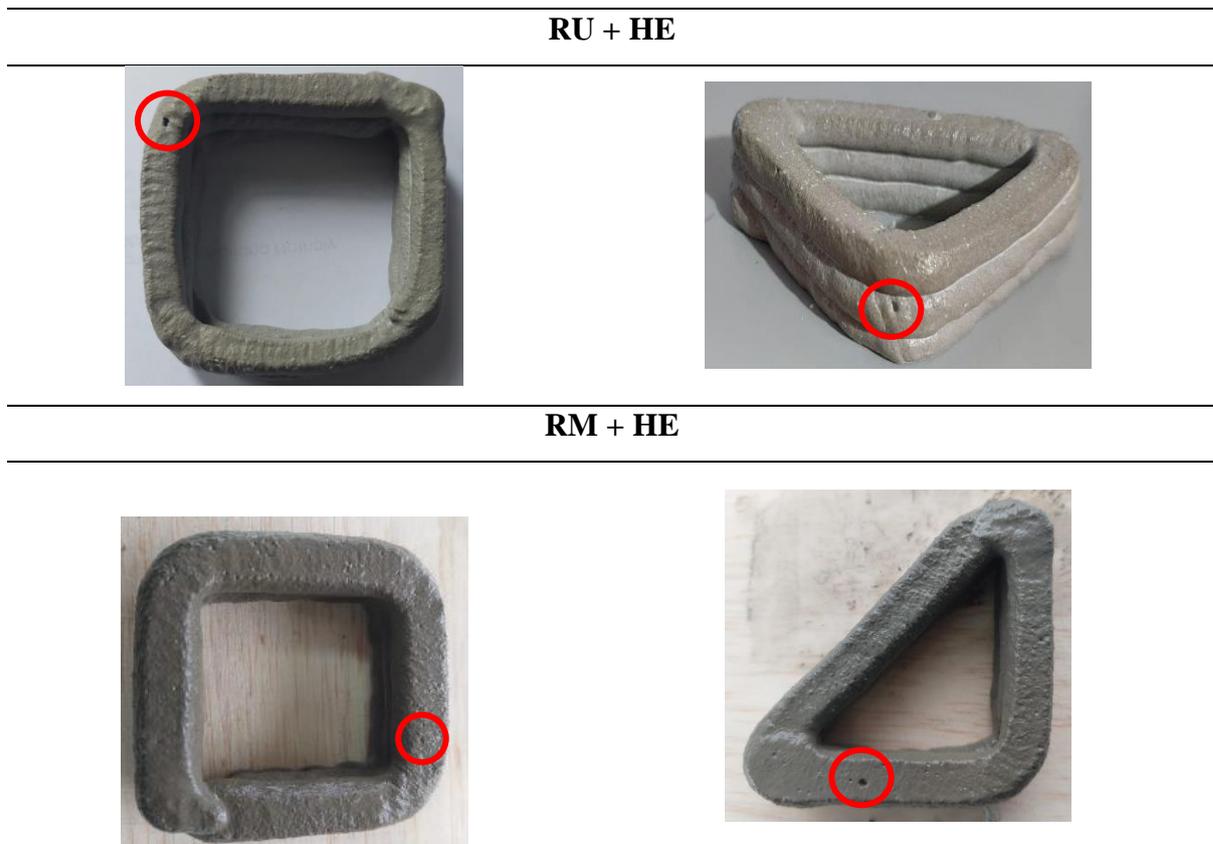
Los morteros elaborados con la mina RM tienen un tiempo trabajable mayor al de la mina RU, teniendo un tiempo aproximado de 3 minutos de impresión para cada modelo de probeta. Sin embargo, los dos morteros poseen un suficiente tiempo de trabajabilidad, ya que cumplen con la impresión de una probeta y según Reyes (2018), si cumple con el objetivo planteado los morteros son óptimos.

#### 4.13.5. Calidad de extrusión (Conformidad y Estabilidad Dimensional)

Este parámetro se valoró de manera óptica, evaluando cada una de las hiladas impresas tanto en una vista frontal como en planta, no presentó cortes ni segregaciones en cada una de ellas, en la Figura 28 se observan los prototipos impresos.

Los morteros realizados para los modelos de probeta tienen una fluidez óptima para el prototipo de impresora utilizada, estos no generaron bloqueos ni taponamientos al ser impresos, sin embargo, al momento de depositar el material hubo problemas de flujo que fueron controlados con el incremento de velocidad del sistema de extrusión del equipo.

En la Figura 28 se puede ver que las probetas presentaron pequeños orificios en las hiladas, lo cual fue dicho por Buswell et al.(2018), estas no son desechadas de acuerdo a lo descrito por Mechtcherine et al. (2020), estas dificultades son una peculiaridad del procedimiento de extrusión compuesto por una boquilla y un tornillo mezclador parecido al prototipo empleado.



**Figura 28.-** Calidad superficial de los morteros impresos

En la Tabla 27 se muestra el análisis estadístico de la estabilidad dimensional y conformidad de la probeta cuadrada, tomando valores de sus cuatro lados y sus tres hiladas dándonos un total de doce aristas por probeta, su dimensión objetiva es de 5,5 cm.

**Tabla 27.-** Análisis Estadístico calidad de extrusión de los morteros modelo cuadrado.

<b>Modelo</b>		<b>Cuadrado</b>	
		<b>RU+HE</b>	<b>RM+HE</b>
Conformidad Dimensional (cm)	Media	5,556	5,549
	Desviación Estándar	0,134	0,135
	Media	-0,009	-0,006
Estabilidad Dimensional (cm)	Desviación Estándar	0,016	0,023

La conformidad dimensional es la media de las tres muestras impresas por cada tipo de arena. La media menor fue de la mina RM siendo de 5,549 cm y la variación presentada está dentro del rango de tolerancia del 10% por las dos arenas, teniendo una adecuada conformidad dimensional. Esta medida de tolerancia del 10% se basa del “Estudio de las características del hormigón para su uso en una máquina de impresión: Selección de propiedades, ensayos experimentales y diseño de mezcla” realizado por (Reyes, 2018).

La estabilidad dimensional es la diferencia de las dimensiones presentadas en estado fresco y fraguado, para este último se consideró un tiempo de una hora y media aproximadamente, los resultados fueron de cero debido a que las dimensiones de hiladas no perdieron su forma, cuando se tiene valores positivos la mezcla se contrae y al ser negativo se expande.

Las probetas presentaron valores negativos, lo que nos dice que la mezcla se expandió y la dosificación de la mina RM presentó una mejor estabilidad dimensional.

En la Tabla 28 se muestra el análisis estadístico de la estabilidad dimensional y conformidad de la probeta triangular, tomando valores de sus tres lados y sus tres hiladas dándonos un total de nueve aristas por probeta, sus dimensiones objetivas fueron para sus catetos de 5,5 cm y su hipotenusa de 7,71 cm.

**Tabla 28.-** Análisis Estadístico calidad de extrusión de los morteros modelo triángulo.

<b>Modelo:</b>		<b>Triángulo</b>			
		RU+HE		RM+HE	
		Catetos	Hipotenusa	Catetos	Hipotenusa
<b>Conformidad</b>	Media	5,543	7,645	5,557	7,663
<b>Dimensional (cm)</b>	Desviación				
	Estándar	0,164	0,118	0,110	0,142
<b>Estabilidad</b>	Media	-0,010		-0,007	
<b>Dimensional (cm)</b>	Desviación	0,011		0,012	
	Estándar				

La conformidad dimensional es la media de las tres muestras impresas por cada tipo de arena. La media menor fue de la mina RU siendo de 5,543 cm para sus catetos y 7,645 cm para la hipotenusa y la variación presentada está dentro del rango de tolerancia del 10% por las dos arenas, teniendo una adecuada conformidad dimensional.

En la estabilidad dimensional las probetas presentaron valores negativos, lo que nos dice que la mezcla se expandió y la dosificación de la mina RM presentó una mejor estabilidad dimensional.

#### 4.13.6. Constructibilidad

Se analizó el tiempo de fraguado inicial y final por el ensayo de Vicat, las muestras fueron ensayadas hilada por hilada y en la Tabla 29 se presenta las medias obtenidas de las probetas impresas.

**Tabla 29.-** Tiempo inicial y final de fraguado de las probetas impresas.

<b>Modelo:</b>	Cuadrado		Triángulo	
	<b>Fraguado Inicial tiempo (min)</b>	<b>Fraguado Final tiempo (min)</b>	<b>Fraguado Inicial tiempo (min)</b>	<b>Fraguado Final tiempo (min)</b>
RU+HE	20	34	19	33
RM+HE	16	28	16	27

En la Tabla 29, se obtuvo tiempos menores de fraguado con respecto al de las propiedades mecánicas presentadas en la Tabla 22, esto se debe a la corrección que se hizo en la dosificación y la ayuda que recibió al estar en la base de la impresora que se encontraba

a una temperatura de 60 °C. La dosificación diseñada con la mina RM presentó menores tiempos de fraguado con respecto a la otra.

En la Tabla 30 y Tabla 31 se presenta el análisis estadístico de las deformaciones del espesor de las hiladas para la probeta cuadrada y triangular respectivamente, las hiladas no se mantuvieron con el espesor diseñado constante y esto se debe a que soporta su peso propio, peso de las hiladas superiores y presión de la extrusión. La deformación uno se produce al colocar una hilada superior, mientras que la deformación dos se produce al colocar una hilada adicional superior.

**Tabla 30.-** Observación estadística deformaciones de hiladas modelo cuadrado.

<b>Modelo:</b>		Cuadrado		
<b>Hilada</b>	<b>Medida</b>	<b>Deformación 1</b>	<b>Deformación 2</b>	
		<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	
RU+HE	1	Media	0,32	0,26
		Desv. Esta	0,15	0,12
	2	Media	0,39	
		Desv. Est	0,11	
RM+HE	1	Media	0,28	0,23
		Desv. Est	0,19	0,19
	2	Media	0,36	
		Desv. Est	0,20	

**Tabla 31.-** Observación estadística deformaciones de hiladas modelo triángulo.

<b>Modelo:</b>		Triángulo		
<b>Hilada</b>	<b>Medida</b>	<b>Deformación 1</b>	<b>Deformación 2</b>	
		<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	
RU+HE	1	Media	0,35	0,30
		Desv. Est	0,12	0,15
	2	Media	0,41	
		Desv. Est	0,26	
RM+HE	1	Media	0,31	0,26
		Desv. Est	0,15	0,11
	2	Media	0,35	
		Desv. Est	0,11	

Se puede apreciar que la deformación uno de la hilada dos sufre mayor deformación, esto se atribuye a que está hilada no se encontraba en contacto con la cama de impresión, la cual estaba a una temperatura de 60°C, la cual ayuda en el proceso de fraguado y a que tenga menos deformación la hilada. Se puede afirmar que el diseño del mortero demostró una excelente resistencia para aguante su propio peso y el de las hiladas superiores. Además, se observó una óptima adherencia entre las hiladas, lo que resultó en una estructura compacta. Es importante destacar que el mortero elaborado con la arena proveniente de la mina RM mostró deformaciones más reducidas en comparación con la otra arena utilizada.

En la Tabla 32 se muestra el análisis estadístico de la deformación total que obtuvo la primera hilada en los dos modelos de probetas.

**Tabla 32.-** Análisis estadístico para deformaciones total de la primera hilada.

<b>Modelo:</b>		<b>Cuadrado</b>	<b>Triángulo</b>
<b>Medida</b>		<b>Deformación total hilada 1 (mm)</b>	
RU+HE	Media	0,58	0,65
	Desv. Est	0,23	0,14
RM+HE	Media	0,52	0,57
	Desv. Est	0,04	0,17

Las probetas impresas tuvieron un tiempo medio de reposo de 1 minuto para cada hilada para que se estabilice y pueda soportar el peso de la hilada superior. En la Tabla 32 se observó que la probeta triangular experimentó una mayor deformación en comparación con el modelo cuadrado. Esta diferencia puede atribuirse a varios factores, siendo uno de los más destacados la cantidad de lados que conforman cada figura. La probeta cuadrada, al tener cuatro lados, requiere unos segundos adicionales de secado antes de colocar la segunda hilada en comparación con la probeta triangular que solo tiene tres lados. Otro factor por considerar son las condiciones externas, como temperatura y humedad. Sin embargo, es importante resaltar que las diferencias de deformación entre ambas probetas no son significativas.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

En la presente investigación se elaboró morteros con arena de río de las minas “Upano” y “Morona” de la parroquia Macas, provincia de Morona Santiago y cemento Portland Tipo HE, los resultados obtenidos respaldan la efectividad y calidad de este mortero en términos de resistencia, adherencia y capacidad de impresión. Estos hallazgos son de gran relevancia y contribuyen significativamente al avance de la tecnología de impresión 3D en el campo de la construcción.

En base a las propiedades físicas analizadas, se puede concluir que el árido fino de las minas "Upano" y "Morona" de la provincia de Morona Santiago presentaron niveles reducidos de impurezas, indicando una calidad aceptable en términos de pureza y ausencia de contaminantes. En cuanto al porcentaje de absorción, se observó que la mina Upano tuvo un valor menor, lo que indica una capacidad limitada para retener agua en comparación con la mina Morona. Además, en términos de contenido de humedad, se encontró que la mina Upano contiene una mayor cantidad de agua en comparación con la mina Morona. Estos resultados resaltan las diferencias que existe entre ambas arenas y son relevantes para evaluar las propiedades del mortero imprimible.

El árido proveniente de la mina Upano mostró un módulo de finura por debajo del rango establecido por la norma INEN NTE 872. A pesar de esto, no se puede rechazar debido a que cumplió satisfactoriamente con los demás ensayos, especialmente en los relacionados con la resistencia a largo plazo.

El análisis químico de la arena proveniente de la provincia de Morona Santiago reveló un alto contenido de sílice en ambas minas. La presencia de sílice en los áridos ha demostrado ser beneficiosa en la mejora de la resistencia y adherencia de los morteros. Esto se debe a que el sílice contribuye al aumento de la densidad de la mezcla, fortaleciendo la estructura y mejorando la resistencia del mortero. Además, la presencia de sílice ayuda a reducir la porosidad en la mezcla, lo que a su vez mejora la adherencia entre los componentes. Asumimos que nuestros morteros presentaron este comportamiento debido a los buenos resultados obtenidos en términos de resistencia y adherencia.

Los morteros elaborados con las minas “Upano” y “Morona” más cemento Portland Tipo HE presentaron resistencias significativamente altas 56,23 MPa y 53,62 MPa respectivamente, las minas de las provincias de Pastaza, Tungurahua y Cotopaxi presentan resistencias bajas con respecto a estas sin embargo el mortero elaborado con el árido de la provincia de Chimborazo presenta la mayor resistencia siendo de 63,82 MPa.

Los morteros con la arena de río de las minas “Upano” y “Morona” más cemento Portland Tipo HE, necesitaron un aumento de aditivo en la dosificación, para lograr la compatibilidad con el prototipo de la impresora, porque al tener una boquilla de extrusión pequeña, necesita que la mezcla sea un poco más fluida para presentar una buena capacidad de bombeo.

Los morteros corregidos presentaron cualidades óptimas para su utilización en la impresión 3D tanto en estabilidad, tiempo trabajable, conformidad, estabilidad dimensional y constructibilidad para los dos modelos (cuadrado y triángulo) de probetas.

## **5.2. Recomendaciones**

En base a los resultados recogidos en la presente investigación y al aporte bibliográfico, se debería construir una impresora 3D a escala real 1:1, para que se puedan comprobar las características que presentan los morteros estudiados.

Investigar el porcentaje óptimo de microsílíce en la dosificación con el fin de reducir la cantidad de cemento sin comprometer la resistencia del material. Esto permitiría disminuir la huella de carbono asociada a la producción de cemento, al utilizar un aditivo que contribuye a mejorar las propiedades y durabilidad del concreto. Es importante encontrar el equilibrio adecuado entre la cantidad de microsílíce y cemento para obtener una mezcla eficiente y sostenible desde el punto de vista ambiental.

## BIBLIOGRAFÍA

- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.006>
- Carvajal, M. J. P., Huilcapi, S. G. O., Bonilla, D. A. G., & Cepeda, M. R. M. (2021). Comportamiento de morteros con áridos locales de la Zona 3 de Ecuador, durante la impresión 3D. *ConcienciaDigital*, 4(1.2), 220–234. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i1.2.1590>
- Castro, C. (2021, July 2). *Impresión 3D como método constructivo alternativo La Casa Henfel, le Corbusier*. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/350689/Castro%2CCristian\\_Impresión 3D como metodo constructivo alternativo. la casa Henfel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/350689/Castro%2CCristian_Impresión%203D%20como%20metodo%20constructivo%20alternativo.%20la%20casa%20Henfel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ferrovia. (2023). *Qué es el cemento, cómo se hace y qué tipos existen*. <https://www.ferrovial.com/es/recursos/cemento/>
- Guía Impresión. (2023). *Historia de la impresión 3D*. <https://guiaimpresion.com/historia-de-la-impresion-3d/>
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, 151, 292–299. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.357>
- INEN NTE 157. (2011). *Cemento Hidráulico. Determinación de la consistencia normal. Método Vicat*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/157.pdf>
- INEN NTE 2502. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación del flujo en morteros*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2502.pdf>
- INEN NTE 696. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los Áridos, Fino y Grueso*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/696.pdf>
- INEN NTE 855. (2010). *Determinación de impurezas orgánicas en el arido fino para hormigón*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/855.pdf>
- INEN NTE 866. (2011). *Árido fino para hormigón. Determinación del efecto de las impurezas orgánicas en la resistencia de morteros*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/866.pdf>
- INEN NTE 872. (2011). *Áridos para Hormigón. Requisitos*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/872-1.pdf>
- Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K., & Rémond, S. (2017). Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *Construction and Building Materials*, 157, 382–391. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.109>
- Llerena, D. (2020). *Diseño de un Mortero con Arena de Rio de la Provincia de Cotopaxi, Utilizando Cemento Portland Tipo I y HE Incluido Cal Hidráulica para el Uso de Impresoras 3D*. [http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/6589/1/Tesis\\_Ayrton Llerena Ing. Civil.pdf](http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/6589/1/Tesis_Ayrton_Llerena_Ing._Civil.pdf)
- Losso, H. M. (2017). *Dosificación de mortero cementicio para impresión 3D*. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6435>
- Luperi, J., & Soffietti, F. (2016). *Dosificación y caracterización de mortero de base cementicia para la impresión 3d*. [https://www.researchgate.net/publication/305463767\\_DOSIFICACION\\_Y\\_CHARACTERIZACION\\_DE\\_MORTERO\\_DE\\_BASE\\_CEMENTICIA\\_PARA\\_LA\\_IMPRESION\\_3D](https://www.researchgate.net/publication/305463767_DOSIFICACION_Y_CHARACTERIZACION_DE_MORTERO_DE_BASE_CEMENTICIA_PARA_LA_IMPRESION_3D)
- Mar, M. (2021, September 30). *Impresiones 3D en la construcción: Avances y Casos reales de aplicación - Konstruedu*. <https://konstruedu.com/es/blog/impresiones-3d-en->

- la-construccion-avances-y-casos-reales-de-aplicacion
- Mariño, E. (2018). *Diseño de un mortero con cemento portland tipo i y he incluida cal hidráulica para su uso en impresoras 3D*.  
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/4777/1/UNACH-EC-ING-CIVIL-2018-0009.pdf>
- Mechtcherine, V., Bos, F. P., Perrot, A., da Silva, W. R. L., Nerella, V. N., Fataei, S., Wolfs, R. J. M., Sonebi, M., & Roussel, N. (2020). Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*, 132, 106037.  
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.106037>
- Mejías, M. C., & Sanz Arauz, D. (2017). *Impresión 3D en hormigón*.
- Osorio Anaya, A. M., Dueñas Morales, F., Aquino Granados, P., Chero Osorio, S., & Condemarin Vargas, R. (2018). *Caracterización e incorporación de nanopartículas industriales de SiO2 Portland tipo I en cemento*.  
[http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2018000300002](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2018000300002)
- PlanRadar. (2022). *Impresión 3D en construcción: Ventajas para la industria*.  
<https://www.planradar.com/es/impresion-3d-construccion/>
- Reyes, H. (2018). *Estudio de las características del hormigón para su uso en una máquina de impresión: selección de propiedades, ensayos experimentales y diseño de mezcla*.  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/153009/Estudio-de-las-caracteristicas-del-hormigon-para-su-uso-en-una-maquina-de-impresion.pdf?sequence=1>
- Roselló Cruz, D. (2022). *Estudio de las aplicaciones de la impresión 3d en el ámbito de la construcción*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/364632>
- Sanchez Izquierdo, F. (2022). *Mortero Impreso en 3D* [Universidad Politécnica de Madrid]. [https://oa.upm.es/70696/1/TFG\\_Junio22\\_Sanchez\\_Izquierdo\\_Fernando.pdf](https://oa.upm.es/70696/1/TFG_Junio22_Sanchez_Izquierdo_Fernando.pdf)
- Sika. (2023). *Acelerar el fraguado y rotar rápidamente la formaleta – PLASTOCRETE 161 HE – Sikaguía Ecuador*. <https://ec.sikaguia.com/producto/acelerar-el-fraguado-y-rotar-rapidamente-la-formaleta-sikaset-wa/>
- Taco, P. (2019). *Diseño de un mortero con arena de la Provincia de Tungurahua, utilizando cemento portland tipo I y HE incluido Cal Hidráulica para el uso de impresoras 3D*. <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/6007/1/UNACH-EC-ING-CIVIL-2019-0020.pdf>
- Torres Remón, R. (2016). *Diseño de hormigón para impresión en 3D* [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/67255>
- UCEM. (2023). *FICHA TÉCNICA DE CEMENTO CHIMBORAZO TIPO HE - PDF Free Download*. <https://docplayer.es/56831766-Ficha-tecnica-de-cemento-chimborazo-tipo-he.html>
- Vallejo, M. (2021). *Diseño de un mortero con arena de río de la Provincia de Pastaza, utilizando Cemento Portland tipo i y he incluido flujo piroclástico para el uso de impresoras 3D*. [http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/8106/1/8.1.Trabajo-de-titulacion\\_Diseño-de-mortero-con-arena-de-rio-de-la-provincia-de-Pastaza.pdf](http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/8106/1/8.1.Trabajo-de-titulacion_Diseño-de-mortero-con-arena-de-rio-de-la-provincia-de-Pastaza.pdf)

## ANEXOS

### Anexo 1.- Ensayo de compresión a corto plazo Mina Upano

<b>Ensayo:</b>		COMPRESIÓN DE CUBOS CORTO PLAZO (50x50) mm		
<b>Ubicación:</b>		Provincia de Morona Santiago		
<b>Dosificación:</b>		RU+HE		
<b>Realizado por:</b>		Arteaga Jessiel; Lascano Adriana		
<b>Tutor de tesis:</b>		Ing. Javier Palacios		
<b>Fecha Inicial de Ensayo:</b>		5/1/2023		
<b>Fecha final de Ensayo:</b>		10/1/2023		
<b>Edad (horas)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Resistencia media (MPa)</b>
<b>3</b>	2509	0,300	0,120	<b>0,13</b>
	2515	0,300	0,119	
	2521	0,400	0,159	
<b>6</b>	2511	0,600	0,239	<b>0,27</b>
	2508	0,700	0,279	
	2519	0,700	0,278	
<b>9</b>	2509	1,200	0,478	<b>0,53</b>
	2512	1,200	0,478	
	2522	1,600	0,634	
<b>12</b>	2504	3,700	1,478	<b>1,36</b>
	2513	3,300	1,313	
	2511	3,200	1,274	

**Anexo 2.-** Ensayo de compresión a corto plazo Mina Morona

<b>Ensayo:</b>		COMPRESIÓN DE CUBOS CORTO PLAZO (50x50) mm		
<b>Ubicación:</b>		Provincia de Morona Santiago		
<b>Dosificación:</b>		RM+HE		
<b>Realizado por:</b>		Arteaga Jessiel; Lascano Adriana		
<b>Tutor de tesis:</b>		Ing. Javier Palacios		
<b>Fecha Inicial de Ensayo:</b>		5/1/2023		
<b>Fecha final de Ensayo:</b>		10/1/2023		
<b>Edad (horas)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Resistencia media (MPa)</b>
<b>3</b>	2521	0,400	0,159	<b>0,17</b>
	2510	0,400	0,159	
	2519	0,500	0,198	
<b>6</b>	2526	1,000	0,396	<b>0,44</b>
	2510	1,100	0,438	
	2514	1,200	0,477	
<b>9</b>	2516	4,900	1,948	<b>1,91</b>
	2527	5,100	2,018	
	2536	4,500	1,774	
<b>12</b>	2523	6,200	2,457	<b>2,57</b>
	2528	6,300	2,492	
	2505	6,900	2,754	

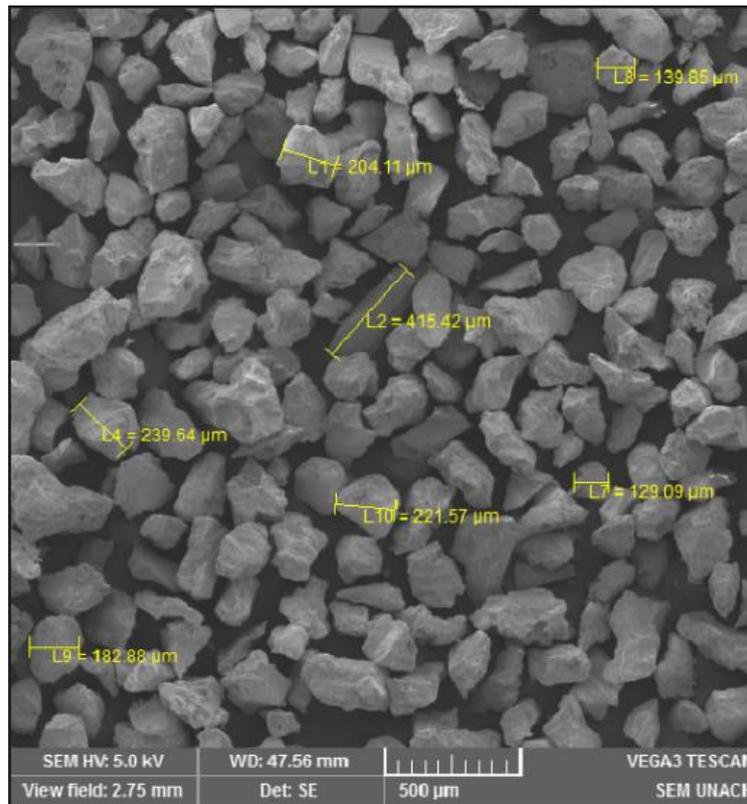
**Anexo 3.-** Ensayo de compresión a largo plazo Mina Upano

<b>Ensayo:</b>		COMPRESIÓN DE CUBOS LARGO PLAZO (50x50) mm		
<b>Ubicación:</b>		Provincia de Morona Santiago		
<b>Dosificación:</b>		RU+HE		
<b>Realizado por:</b>		Arteaga Jessiel; Lascano Adriana		
<b>Tutor de tesis:</b>		Ing. Javier Palacios		
<b>Fecha Inicial de Ensayo:</b>		14/12/2022		
<b>Fecha final de Ensayo:</b>		18/1/2023		
<b>Edad (días)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Resistencia media (MPa)</b>
<b>7</b>	2507	116,58	46,502	<b>44,335</b>
	2512	110,15	43,850	
	2524	107,66	42,655	
<b>14</b>	2516	117,45	46,681	<b>48,387</b>
	2534	125,86	49,669	
	2507	122,37	48,811	
<b>21</b>	2518	121,23	48,145	<b>51,471</b>
	2525	136,13	53,913	
	2531	132,51	52,355	
<b>28</b>	2509	136,52	54,412	<b>56,227</b>
	2504	144,09	57,544	
	2506	142,15	56,724	

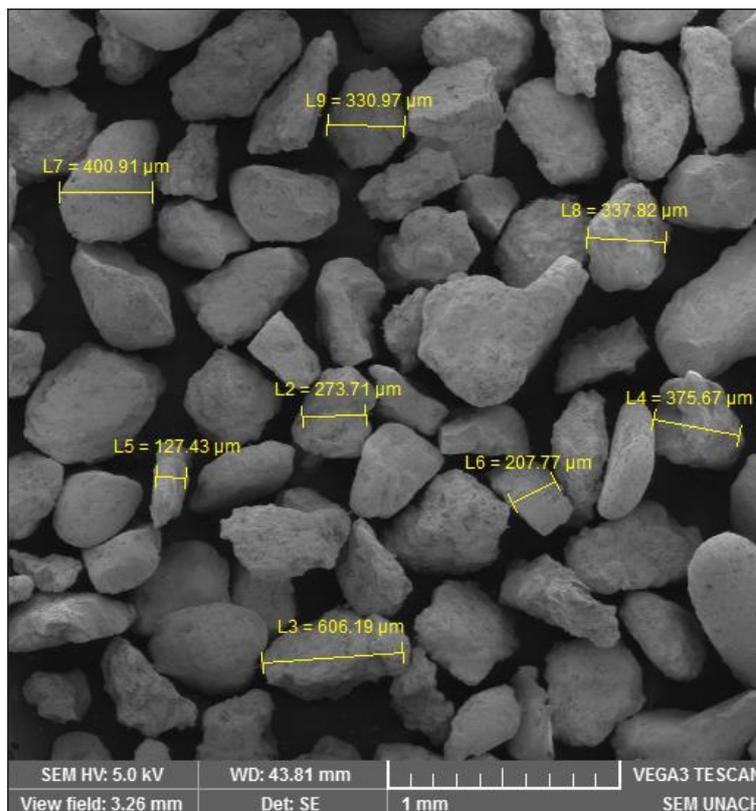
**Anexo 4.-** Ensayo de compresión a largo plazo Mina Morona

<b>Ensayo:</b>		COMPRESIÓN DE CUBOS LARGO PLAZO (50x50) mm		
<b>Ubicación:</b>		Provincia de Morona Santiago		
<b>Dosificación:</b>		RM+HE		
<b>Realizado por:</b>		Arteaga Jessiel; Lascano Adriana		
<b>Tutor de tesis:</b>		Ing. Javier Palacios		
<b>Fecha Inicial de Ensayo:</b>		14/12/2022		
<b>Fecha final de Ensayo:</b>		18/1/2023		
<b>Edad (días)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Resistencia media (MPa)</b>
<b>7</b>	2508	108,61	43,305	<b>44,229</b>
	2545	116,51	45,780	
	2524	110,05	43,601	
<b>14</b>	2543	122,11	48,018	<b>47,040</b>
	2539	124,66	49,098	
	2562	112,74	44,005	
<b>21</b>	2551	127,89	50,133	<b>49,844</b>
	2537	130,42	51,407	
	2516	120,75	47,993	
<b>28</b>	2511	132,22	52,656	<b>53,624</b>
	2535	138,95	54,813	
	2531	135,16	53,402	

**Anexo 5.-** Análisis químico de la Mina Upano



**Anexo 6.-** Análisis químico de la Mina Morona

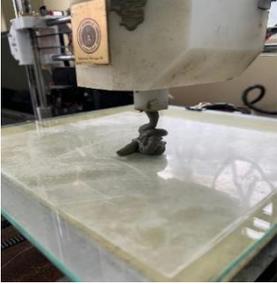


**Anexo 7.-** Evidencia fotográfica del desarrollo de la investigación.

<p>Foto 1. Coordenadas de los áridos con los cuales se trabajó Mina Upano.</p>	
<p>Foto 2. Coordenadas de los áridos con los cuales se trabajó Mina Morona.</p>	
<p>Foto 3. Tamizado de arena de río, para la elaboración del ensayo de granulometría.</p>	
<p>Foto 4. Secado de la muestra en el horno a <math>110 \pm 5</math> °C.</p>	
<p>Foto 5. Toma de datos y pesos del árido.</p>	
<p>Foto 6. Secado de muestras en horno a <math>110 \pm 5</math> °C para el ensayo de contenido de humedad.</p>	

<p>Foto 7. Ensayo del cono para determinar el estado SSS del árido.</p>	
<p>Foto 8. Encofrado para muestras.</p>	
<p>Foto 9. Mezclado de los materiales para elaboración de morteros.</p>	
<p>Foto 10. Encofrado y enrazado del mortero en el encofrado.</p>	
<p>Foto 11. Desencofrado de las probetas a las 24 horas.</p>	

<p>Foto 12. Probetas sumergidas en la cámara de curado.</p>	
<p>Foto 13. Toma de dimensiones con calibrador o pie de rey.</p>	
<p>Foto 14. Ensayo de cubo de mortero a compresión.</p>	
<p>Foto 15. Resistencia de las probetas en la máquina de ensayo.</p>	
<p>Foto 16. Compactación de la muestra de mortero.</p>	
<p>Foto 17. Toma de diámetros de las muestras</p>	

<p>Foto 18. Determinación de la consistencia normal y tiempo de fraguado (Método Vicat).</p>	
<p>Foto 19. Ensayo en impresora 3D.</p>	
<p>Foto 20. Modelo digital impreso triángulo.</p>	
<p>Foto 21. Modelo digital impreso cuadrado.</p>	