

DOCTORADO EN INGENIERÍA mención INDUSTRIAL

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe



Título de Tesis:

Estudio de las características físicas, químicas y mecánicas del Bloque de Tierra Comprimida (BTC) con suelo-cal y adiciones minerales.

Aportes al conocimiento del BTC para su desarrollo en Santa Fe, Argentina.

Tesista:

Ing. Santiago Pedro Cabrera

Director:

Dr. Rodolfo Rotondaro

Codirectores:

Dra. Anabela Guilarducci

Mg. Ariel González

Ing. Santiago Cabrera

*Dedicado a Ariel González, por iniciarme y acompañarme en este proceso,
pero sobre todo por haberme enseñado que este camino era posible*

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe por brindarme el espacio y la infraestructura necesarios para el desarrollo de esta Tesis; pero particularmente por haberse convertido en mi segundo hogar.

Al Grupo TIERRA FIRME y sus integrantes, que ayudaron con el desarrollo de las tareas experimentales y me brindaron su apoyo incondicional durante todo el proceso.

Al Estado argentino por brindarme la posibilidad de una educación gratuita y de excelencia en todos los niveles de mi formación académica, y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas por el financiamiento de la beca doctoral.

A mis 3 directores, quienes marcaron con consignas claras el rumbo de la tesis, pero sin comprometer mi libertad de trabajo.

A mi familia y amistades, quienes estuvieron presente en todos y cada uno de los momentos del doctorado, por su apoyo incondicional.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a Ustedes, por su dedicación, motivación y acompañamiento.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	8
<i>I.1 Planteo de la problemática</i>	<i>9</i>
I.1.a El déficit habitacional argentino.....	9
I.1.b Materiales empleados en la construcción de viviendas en Argentina	10
<i>I.2 Las técnicas de construcción con tierra</i>	<i>11</i>
I.2.a Técnicas mixtas: quincha y enchorizado	13
I.2.b Tapia	15
I.2.c Adobe	16
I.2.d Bloque de Tierra Comprimida BTC	17
<i>I.3 Incorporación de estabilizantes en la construcción con tierra</i>	<i>19</i>
I.3.a Utilización de cal como estabilizante	20
I.3.b Utilización de materiales puzolánicos en la estabilización	23
<i>I.4 Preguntas de investigación</i>	<i>24</i>
<i>I.5 Hipótesis y objetivos</i>	<i>25</i>
I.5.a Hipótesis de trabajo.....	25
I.5.b Objetivos.....	25
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	27
<i>II.1 La tecnología del BTC</i>	<i>28</i>
II.1.a Desarrollo histórico del BTC	28
II.1.b Ventajas del BTC comparado con otros mampuestos.....	29
<i>II.2 Antecedentes principales</i>	<i>34</i>
II.2.a Publicaciones sobre BTC.....	34
II.2.b Materiales empleados en la estabilización de BTC.....	36
<i>II.3 Marco normativo de la construcción con tierra en el mundo</i>	<i>39</i>
<i>II.4 Marco normativo de la construcción con tierra en Argentina</i>	<i>42</i>
II.4.a Normas jurídicas.....	43
II.4.b Normas técnicas	46
<i>II.5 Desarrollo del BTC en Argentina</i>	<i>47</i>
II.5.a Investigación y transferencia.....	48

II.5.b	El sector productivo.....	51
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		54
III.1	Aspectos metodológicos generales	55
III.2	Obtención de los materiales	56
III.3	Caracterización física de los materiales	58
III.3.a	Análisis granulométrico	58
III.3.b	Densidad aparente	59
III.3.c	Caracterización de la tierra.....	60
III.4	Caracterización química de los materiales	63
III.4.a	Ensayos analíticos.....	63
III.4.b	Cal útil vial	68
III.4.c	Determinación de la capacidad puzolánica de las adiciones.....	69
III.5	Confección de probetas	71
III.5.a	BTC producidos en laboratorio.....	71
III.5.b	Probetas cilíndricas.....	73
III.5.c	BTC producidos en fábrica.....	76
III.5.d	Preparación de probetas para la realización de ensayos	77
III.6	Propiedades químicas de las probetas	78
III.6.a	Difracción de rayos X (DRX)	78
III.6.b	Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)	78
III.6.c	Microscopía electrónica de transmisión (TEM)	78
III.7	Ensayos físicos y mecánicos.....	79
III.7.a	Determinación de la densidad seca.....	79
III.7.b	Resistencia a compresión seca	80
III.7.c	Absorción de agua por inmersión.....	81
III.7.d	Resistencia a compresión saturada	82
III.7.e	Absorción de agua por capilaridad	83
III.7.f	Resistencia a erosión húmeda	84
III.7.g	Análisis estadístico.....	85
III.8	Evaluación del impacto ambiental	85
III.8.a	Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	85
III.8.b	Trabajo de campo	87

CAPÍTULO IV: RESULTADOS	90
<i>IV.1 Caracterización física de los materiales</i>	91
IV.1.a Análisis granulométrico	91
IV.1.b Densidad aparente	93
IV.1.c Caracterización de la tierra.....	94
<i>IV.2 Caracterización química de los materiales</i>	97
IV.2.a Cal útil vial	97
IV.2.b Ensayos analíticos.....	97
IV.2.c Determinación de la capacidad puzolánica	111
<i>IV.3 Propiedades químicas de las probetas</i>	115
IV.3.a Microscopía electrónica de barrido (FESEM)	115
IV.3.b Difracción de rayos X (DRX)	128
IV.3.c Microscopía electrónica de transmisión (TEM)	135
<i>IV.4 Ensayos físicos y mecánicos</i>	148
IV.4.a Densidad seca	148
IV.4.b Resistencia a compresión seca	153
IV.4.c Resistencia a compresión saturada	164
IV.4.d Absorción de agua por inmersión.....	168
IV.4.e Absorción de agua por capilaridad	171
IV.4.f Resistencia a erosión húmeda	174
<i>IV.5 Evaluación del impacto ambiental</i>	178
IV.5.a Trabajo de campo	178
IV.5.b Impacto ambiental	178
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	180
<i>V.1 Sobre los materiales empleados</i>	181
V.1.a Tierra y arena.....	181
V.1.b Estabilizantes	184
V.1.c Adiciones minerales.....	185
<i>V.2 Sobre la confección de probetas</i>	188
V.2.a Proceso de dosificación y compresión de las prensas comercialmente disponibles.....	188
V.2.b Probetas de ensayo empleadas en las investigaciones de BTC	191
<i>V.3 Sobre las propiedades químicas de las probetas</i>	194

<i>V.4</i>	<i>Sobre las propiedades físicas y mecánicas</i>	<i>197</i>
V.4.a	BTC producidos en laboratorio	197
V.4.b	Densidad de las probetas	199
V.4.c	Resistencia a compresión	200
V.4.d	Absorción de agua	204
V.4.e	Erosión húmeda.....	205
<i>V.5</i>	<i>Sobre el impacto ambiental de los BTC</i>	<i>207</i>
<i>CAPITULO VI: CONCLUSIONES</i>		<i>212</i>
<i>VI.1</i>	<i>Conclusiones parciales</i>	<i>213</i>
VI.1.a	Desarrollo de la tecnología del BTC en Argentina	213
VI.1.b	Materiales.....	214
VI.1.c	Efectos de la relación tierra/arena y de la estabilización con cal y con cemento	214
VI.1.d	Propiedades químicas de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales.....	215
VI.1.e	Propiedades físicas y mecánicas de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales	215
VI.1.f	Impacto ambiental de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales.....	216
<i>VI.2</i>	<i>Conclusiones generales y comentarios finales</i>	<i>216</i>
<i>VI.3</i>	<i>Continuidad de la investigación</i>	<i>218</i>
<i>ANEXO I</i>		<i>219</i>
<i>ANEXO II</i>		<i>220</i>
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>		<i>221</i>

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

I.1 PLANTEO DE LA PROBLEMÁTICA

I.1.a El déficit habitacional argentino

Según estimaciones realizadas por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) la población actual de la Argentina en el año 2020 supera los 45 millones de habitantes, lo que implica un incremento del 11 % con respecto a la cantidad de habitantes contabilizada en el último censo de población realizado en el año 2010. Según proyecciones del mismo organismo, se espera que para el año 2040, la población argentina alcanzará los 52 millones de habitantes [1].

Los datos oficiales del INDEC dan cuenta que el 62% de la población argentina (más de 28 millones de personas) vive actualmente en conglomerados urbanos. Al segundo semestre del año 2019, el 24.2% de los habitantes de estos conglomerados habitan en viviendas cuyos materiales poseen calidad insuficiente para el adecuado desarrollo de la familia. Además, el 17 % de los hogares en estos conglomerados urbanos se encuentran en condición de hacinamiento, siendo el 5% de los casos hacinamiento crítico [2]. Esto implica que 232.000 hogares, habitados por 1.409.000 personas viven actualmente en estas condiciones.

La Secretaría de Vivienda de la República Argentina estima un déficit habitacional del 25,4 %, lo que se traduce en 3.5 millones de familias con problemas habitacionales. Al desagregar la problemática se observa que, de esa última cifra, 2 millones presentan inconvenientes en la calidad de la vivienda, de las cuales 1.3 millones tienen situaciones de hacinamiento, y las restantes 1.5 millones son las viviendas nuevas que se necesita construir [3].

Esta problemática no sólo afecta a las clases más pobres y vulnerables, sino también a las clases medias que cuentan con mayores recursos económicos. De acuerdo con el Observatorio de la Deuda Social Argentina de la Universidad Católica Argentina (UCA), el primero de estos sectores parte ya de la imposibilidad de acceder por vías formales a suelo urbanizado, lo que hace de la auto-urbanización la solución más alcanzable para estas familias, aunque ello implique la precariedad edilicia y sanitaria [4]. Da cuenta de ello el hecho de que el 16.7 % de la población urbana y periurbana de Argentina habita en hogares que no disponen de un sistema de saneamiento adecuado; el 6,6% de los hogares se encuentra cerca de basurales y el 11,4% se localiza en zonas inundables [2].

I.1.b Materiales empleados en la construcción de viviendas en Argentina

El material preponderante empleado en la construcción de muros y cerramientos en la construcción de Viviendas en Argentina es el tradicional ladrillo macizo de producción artesanal, frecuentemente denominado “ladrillo común” [5]. En las últimas décadas se han incorporado variantes industrializadas de este mampuesto, producidos por extrusión y cocción controlada en hornos de temperatura regulable: el ladrillo cerámico hueco y el bloque cerámico portante. Todos estos mampuestos se producen por la cocción de minerales arcillosos a una temperatura aproximada de 850 °C [6].

Otro mampuesto que ha tomado impulso en la construcción de viviendas en Argentina es el bloque de hormigón, el cual se ha popularizado por la maquinaria mínima requerida para su fabricación y la facilidad y rapidez que brindan a la construcción de muros. Esto se debe a sus grandes dimensiones, mayores que la de los ladrillos cerámicos huecos y macizos, y a su regularidad dimensional [7].

Finalmente, en la última década se ha popularizado la utilización de bloques de hormigón celular curado en autoclave por su baja densidad, elevada resistencia y gran capacidad de aislación térmica. Estas propiedades han impulsado su utilización como bloques de cerramiento en edificios y construcciones con estructura independiente de hormigón armado [8].

Es de considerar el impacto ambiental causado por la utilización de todos los mampuestos mencionados, teniendo en cuenta las siguientes particularidades:

- Altas temperaturas de cocción, con el consecuente consumo de energía de biomasa (leña) o gas y la emanación de grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera.
- Utilización de grandes cantidades de cemento Portland, de elevado costo ambiental y económico.
- Grandes distancias de transporte. La fabricación de cemento Portland se encuentra localizada en algunos puntos específicos del País, desde donde es transportado en vehículos que emplean combustibles fósiles al resto del país.

I.2 LAS TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA

Durante milenios, los seres humanos han utilizado al suelo como material de construcción en diversas formas: encofrada y compactada; mezclado con paja y puesta a mano, ya sea sola o como relleno y recubrimiento en estructuras de madera; o como unidades de mampostería, generalmente moldeados a mano y secados al sol [9].

La arquitectura y construcción con tierra poseen una larga trayectoria en la historia de la humanidad, y aunque sus primeros antecedentes se remontan a más de 9 mil años de antigüedad, en diversos contextos sigue estando tan vigente como en su origen, tal es así que se estima que más de un tercio de los habitantes del planeta viven en casas de tierra [10].

La continuidad histórica de la arquitectura y construcción con tierra se debe en gran medida a la abundancia de su materia prima, la economía de sus procesos constructivos, sus cualidades bioclimáticas y a la armonía de su interrelación con el ambiente natural en que se desenvuelve [11]. Esto lo saben, sustentan y defienden los pueblos con tradiciones locales, especialmente aquellas ligadas a cultos ancestrales con la tierra. Con sabiduría popular producen “*arquitectura sin arquitectos*” [12] adecuándose al clima y costumbres de cada sitio y sociedad, concertando calidad de vida con utilización racional de los recursos físicos aprovechables, a la vez de optimizar las alternativas disponibles para reducir el déficit habitacional [13].

Existen numerosas técnicas y sistemas constructivos que emplean tierra como materia prima preponderante (Figura 1), sin embargo, éstas pueden clasificarse de manera simplificada dentro de las siguientes categorías:

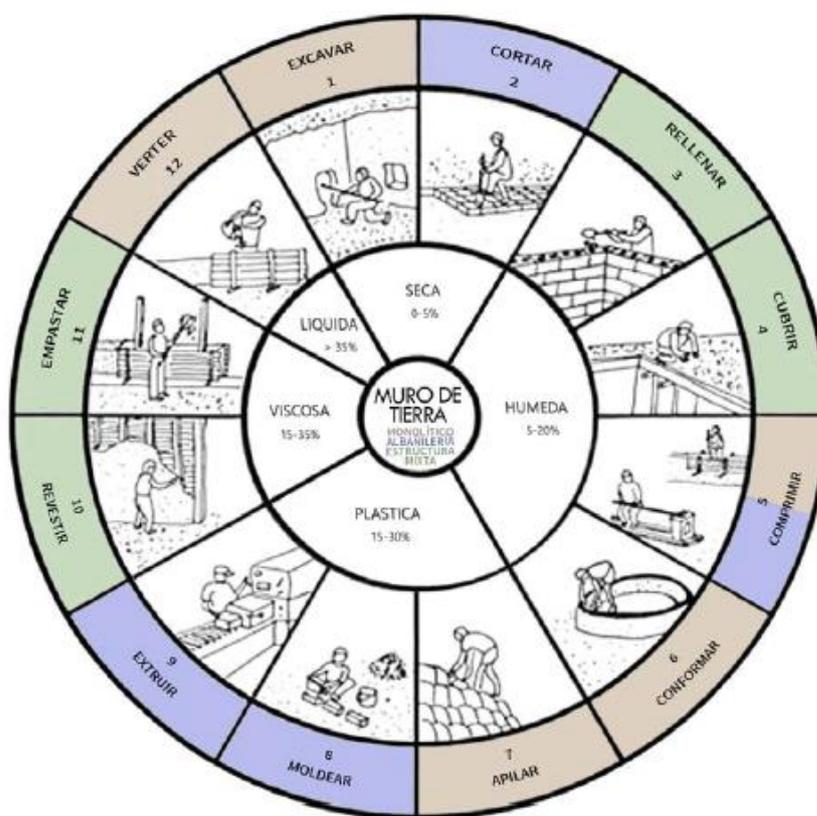


Figura 1: Técnicas de construcción con tierra.

Fuente: Arquitecturas de Tierra: El arte de construir con tierra [14].

- **Técnicas mixtas:** La tierra se emplea como material de relleno y revestimiento, valiéndose entonces de una estructura portante independiente, generalmente construida con madera. Existen numerosas variantes de estas técnicas, siendo las más empleadas en Argentina la quincha, la tierra alivianada o paja encofrada (técnicas 10 y 11 de la Figura 1) y el enchorizado.
- **Técnicas monolíticas:** aquellas técnicas en las que, mediante el moldeo directo con las manos o la utilización de encofrados móviles llenos con morteros compactados o vertidos, se construyen muros monolíticos, generalmente con capacidad portante. Ejemplos de estas técnicas son la tapia, la tierra moldeada o COB y la tierra vertida (técnicas 5, 6, 7 y 12 de la Figura 1).
- **Técnicas de albañilería:** son aquellas que emplean componentes prefabricados de pequeñas dimensiones, producidos previamente a la construcción de la vivienda. Estos componentes se adhieren entre sí empleando morteros de tierra. Los muros construidos

con bloques de tierra comprimida (BTC) o adobes (técnicas 5 y 8 de la Figura 1) son ejemplos de estas técnicas.

En los apartados siguientes se detallan los conceptos básicos de las técnicas de construcción con tierra de uso más frecuente en Argentina.

1.2.a Técnicas mixtas: quincha y enchorizado

Dentro de esta clasificación se reúnen las técnicas que implican el armado de una trama que posteriormente se embarra para formar un paramento vertical.

Se conoce con el nombre de quincha o bahareque al sistema constituido por una estructura de maderas o cañas, generalmente dispuestas en dos sentidos –horizontal y vertical o cruce de diagonales– que corre entre las columnas que conforman la estructura independiente de la vivienda, también de madera. Una vez armada esta estructura principal, se procede a construir la trama secundaria que irá apoyada o amurada sobre la primera y que, finalmente, será embarrada. En la Figura 2 pueden apreciarse diferentes tipos de entramados para quincha antes de ser embarrados.

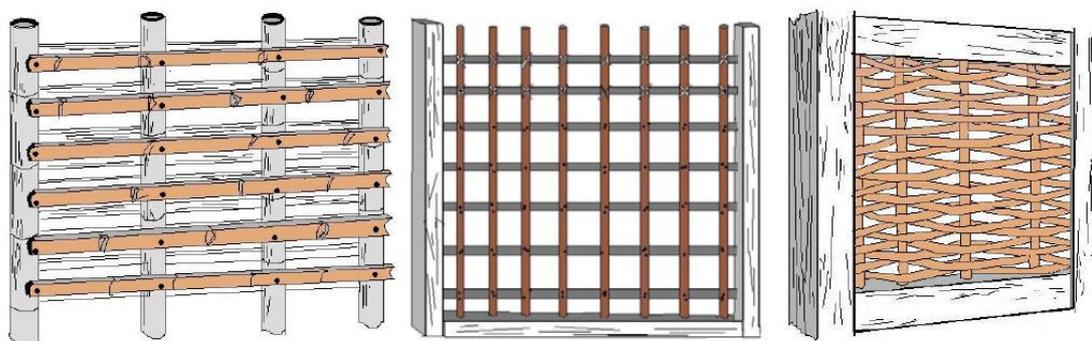


Figura 2: Ejemplos de entramados para quincha. **Fuente:** Libro “Técnicas de Construcción con Tierra” [11].

Luego del embarrado, puede ejecutarse una capa de revoque para aumentar la durabilidad del cerramiento. Asimismo, es habitual contar con una protección que aleje las gotas de lluvia del muro, como un alero o galería, ya que este tipo de pared presenta una baja durabilidad ante los efectos del agua. En la Figura 3 se muestra el embarrado de la trama secundaria de una bodega vitivinícola construida con la técnica de quincha en el año 2012 en la comuna de Cauquenes, Chile.



Figura 3: Embarrado del entramado de una bodega vitivinícola construida con la técnica de quincha en la comuna de Cauquenes, Chile. **Fuente:** Libro “Architecture en Terre D’Aujourd [15].

Otro sistema de construcción con tierra que emplea el entramado es el *chorizo* o *enchorizado*, ampliamente utilizado en viviendas rurales de la pampa argentina [16]. Como el anterior, este sistema de cerramiento vertical consta de una estructura independiente sobre la que se adosa una trama, pero ésta tiene características diferentes. El “enrejado” del *enchorizado* tiene principalmente elementos horizontales, colocándose cada tanto algunos verticales, siempre que sean realmente necesario. Actualmente se atan entre las columnas principales de la estructura independiente, generalmente de madera, alambres horizontales bien tensados que hacen innecesario el uso de parantes verticales. En la Figura 4 se muestra de manera esquemática la colocación de los “chorizos” sobre la trama de alambres.

Armada la trama de alambres, se amasan en el suelo con barro y fibras vegetales sin cortar los chorizos de aproximadamente 60 cm de longitud y del máximo grosor que permita la calidad del material. De la longitud de estos “chorizos” dependerá la separación de los alambres horizontales del entramado.

Cuando el chorizo está listo, este se cuelga de un alambre y se cruzan las puntas por debajo del siguiente, armándose así un lazo en forma de 8. Inmediatamente se arma otro por debajo y se coloca junto al primero, tocándolo para que ambos sequen y endurezcan juntos. Es importante colocar los chorizos bien apretados entre sí, uno colgado junto al otro. Se colocan primero los de la hilada inferior y luego los de las demás hiladas hacia arriba. Con la mano van trabajándose los

traslapes a fin de dar una superficie continua. Una vez terminado el *enchorizado* de todo el tramo del muro –y una vez seco– se procede a revocar de igual manera que en la quincha.

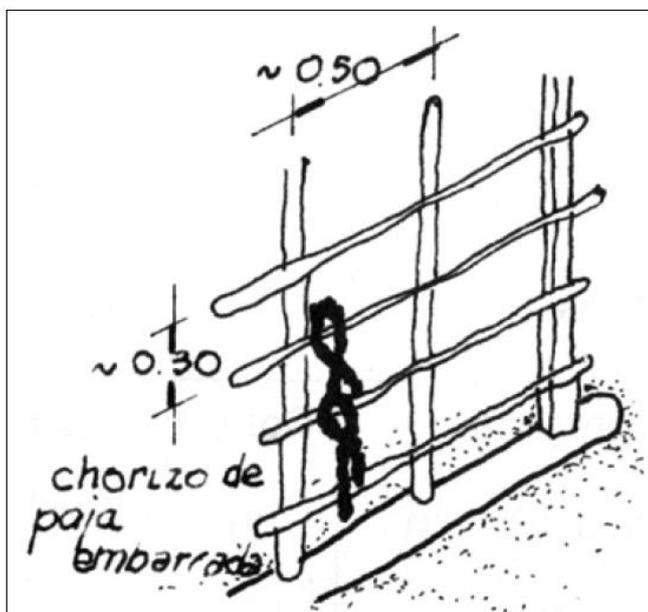


Figura 4: Detalle de colocación de los chorizos sobre la trama de alambre en la técnica conocida como *enchorizado*. **Fuente:** Artículo “Tecnología y Construcción con Tierra” [16].

1.2.b Tapia

La tecnología conocida como tapia, tapial o tierra apisonada en cajón fue utilizada en Latinoamérica desde antes de la llegada de los conquistadores españoles, quienes a su vez también la utilizaban en su país de origen [16]. Se basa en la conformación de muros “*in situ*” mediante el apisonado de tierra húmeda dentro de moldes deslizantes de madera o metal, siendo un sistema monolítico que no posee juntas con morteros.

Para construir un muro de tapia se debe colocar el encofrado a lo largo de todo el muro a levantar o conformando paños individuales, en virtud de las dimensiones de los moldes. Estos encofrados por lo general no difieren en mayor medida de los empleados para construir tabiques de hormigón armado. Una vez verificada la verticalidad y correcta posición de los encofrados, se vierte la tierra húmeda en su interior -aproximadamente 15 cm de altura en cada capa- y se compacta con golpes de pisón hasta alcanzar la máxima densidad del material, lo cual se evidencia por un sutil cambio de ruido y porque el pisón ya no deja marca sobre la capa de tierra compactada.

Este proceso se repite hasta alcanzar el borde superior del encofrado, luego de lo cual se procede a desmoldar el paño de tapia construido y armarlo nuevamente junto al tramo de muro finalizado, repitiendo el proceso.

Existe gran diversidad de moldes para tapia, siendo los más habituales de madera. Asimismo, los pisones empleados para la compactación pueden ser manuales -de madera o metal- y automáticos, impulsados por un sistema neumático. Estos últimos disminuyen significativamente el trabajo físico realizado por los constructores, acelerando el proceso constructivo.

En la Figura 5 puede observarse un esquema del proceso constructivo de un paño de tapia encofrado con moldes de madera con un pisón manual, también de madera. En la Figura 6 se muestra la construcción de un muro de tapia con encofrados “trepantes” y pisones neumáticos.

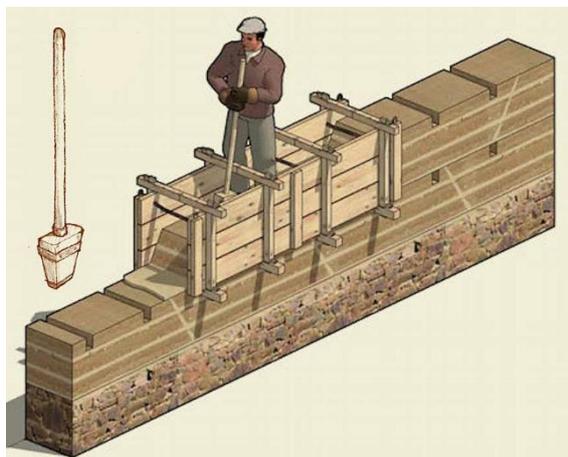


Figura 5: Esquema del proceso constructivo de un muro de tapia con encofrados de madera y pisón manual. **Fuente:** Libro “Réhabiliter le Pisé” [17].



Figura 6: Construcción de un muro de tapia con encofrados trepantes y pisones neumáticos. **Fuente:** Libro “Architecture en Terre D’Aujourd” [15].

1.2.c Adobe

El adobe es un componente prefabricado de tierra que puede contener paja u otro material que mejore su estabilidad y evite la aparición de fisuras durante su proceso de secado. Se fabrica mediante el moldeo manual o mecanizado de una mezcla plástica de barro dentro de moldes -generalmente de madera- que se retiran de manera inmediata. Luego, se dejan secar a la intemperie durante varios días, protegidos del sol y la lluvia, hasta que pueda ser utilizado. En la Figura 7 se muestra la producción diaria (izquierda) de una adobera tradicional en la ciudad de Amayuelas (España) junto a la producción del día anterior (derecha), la cual fue volteada para acelerar su proceso de secado.



Figura 7: Adobes recién “cortados” (izquierda) y adobes con dos días de antigüedad, volteados de lado para favorecer el proceso de secado (derecha). **Fuente:** Elaboración propia.

La tapia y el adobe son los sistemas constructivos de tierra más conocidos, utilizados y difundidos, pero a diferencia de la primera, los adobes además de ser empleados para construir cerramientos verticales se utilizan en la construcción de arcos y cubiertas mediante el sistema de cúpulas. Estos bloques son utilizados en América desde épocas precolombinas, manteniéndose su empleo luego de la llegada de los conquistadores, quienes también lo usaban en sus países de origen.

Para construir muros y cubiertas con adobes se utiliza un mortero de barro -con o sin la incorporación de fibras vegetales- empleando tecnologías que varían de acuerdo con las costumbres y capacidades de cada región. Además, las dimensiones de los adobes presentan gran variabilidad según la zona en la cual son producidos, presentando sin embargo una relación lógica de lados y un volumen y peso final que les permite ser manipulados sin romperse por una sola persona, sin fatigarla.

El adobe y sus muros y cubiertas siguen siendo principalmente sistemas artesanales de fabricación de componentes básicos y construcción de cerramientos (muros), y su utilización sigue vigente a escala global, en algunas regiones como la principal o única posibilidad para edificar [11].

1.2.d Bloque de Tierra Comprimida BTC

El Bloque de tierra comprimida o BTC es un mampuesto fabricado mediante la compresión de un mortero de tierra, generalmente estabilizada con cal o cemento, que se encuentra contenido en el interior de una prensa específicamente diseñada para tal fin, cuyo accionamiento puede ser

manual o automatizado, dependiendo del nivel de producción requerido. La forma de estos bloques es variable y depende de la matriz empleada durante su fabricación, pudiendo ser macizos, huecos o encastrables.

La tierra empleada para la fabricación de estos bloques debe prepararse de manera adecuada, desmenuzando los terrones de tierra y separando las partículas de mayor tamaño, luego de lo cual se procede al primer mezclado en seco con el resto de los componentes (generalmente estabilizantes como cal y cemento) hasta obtener un color uniforme; luego se agrega agua mediante el empleo de un aspersor o pulverizador hasta alcanzar el contenido óptimo de humedad, el cual es similar al empleado por la tapia (mezcla húmeda) y significativamente menor al requerido para moldear adobes (mezcla plástica).

Una vez preparada, la mezcla se coloca dentro de las prensas y éstas se accionan, fabricando así los BTC. Una vez removidos de la máquina, los bloques deben mantenerse saturados de agua por al menos 7 días para favorecer las reacciones químicas de la cal y el cemento (proceso de curado), luego de los cuales, son secados de manera controlada, resguardados del sol y la lluvia.

A diferencia de las técnicas de construcción con tierra hasta ahora mencionadas, las cuales poseen cientos e incluso miles de años de antigüedad, la tecnología del BTC fue promocionada en Colombia a comienzos de los años 1950 en el Centro Interamericano de Vivienda "CINVA" como una alternativa económica para la fabricación de bloques de construcción, y actualmente es considerada como una de las tecnologías latinoamericanas más difundidas en el mundo [18].

En comparación con el adobe como mampuesto, el BTC es considerado por algunos autores como un salto tecnológico respecto de este último. Puede considerarse que son similares por su posibilidad de producción manual y las formas en las cuales son empleados para la construcción de muros y cubiertas como mampuestos que trabajan a compresión, pero el BTC presenta aspectos que lo diferencian sustancialmente del tradicional adobe: además del contenido de agua y los materiales constitutivos del mortero, la forma y los tiempos de producción, en su fabricación interviene maquinaria especializada. Esta última particularidad permite al BTC integrarse de manera más acorde a los contextos de producción de la industria de la construcción convencional vigente en la actualidad y posibilita su fabricación de manera industrializada [19].

En la Figura 8 se muestra la hilada inicial de una obra construida con BTC en el paraje El Nochero, Santa Fe, Argentina. Los bloques encastrables fueron producidos con una prensa de accionamiento manual denominada “Mattone”.



Figura 8: Inicio de una construcción con BTC encastrables producidos por los pobladores mediante el empleo de una prensa “Mattone” en el Nochero, Santa Fe. **Fuente:** Ariel González, 2008.

I.3 INCORPORACIÓN DE ESTABILIZANTES EN LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA

Para un adecuado desempeño de las técnicas de construcción con tierra mencionadas es necesario que se cumplan dos condiciones importantes:

- Las características de la tierra empleada (distribución granulométrica y plasticidad) deben ser adecuadas. De no cumplirse esta condición, la resistencia mecánica de los elementos constructivos será insuficiente para cumplir funciones estructurales.
- Independientemente del tipo de suelo empleado, la durabilidad de las construcciones será adecuada y sostenible durante muchos años de vida útil siempre y cuando se realice el mantenimiento apropiado a cada una de las técnicas, teniendo en cuenta las condiciones ambientales propias de cada región y las características de la edificación.

Ambas condiciones pueden minimizarse e incluso eliminarse empleando pequeños porcentajes de estabilizantes durante la preparación de los morteros de tierra, los cuales mejoran sus propiedades físico-mecánicas, aumentando su resistencia y durabilidad.

Se entiende por estabilizante a cualquier sustancia o aditivo que, incorporado a la tierra, mejora significativamente alguna de sus propiedades. De esta manera, la incorporación de fragmentos de paja u otras fibras vegetales reduce la retracción generada durante el secado del barro; la adición de aceites vegetales y emulsiones asfálticas disminuye significativamente la permeabilidad de la tierra, mejorando su durabilidad. La incorporación de aglomerantes minerales –generalmente cal y cemento- produce aumentos considerables de la resistencia mecánica y mejora la durabilidad [20].

Diversos aditivos han sido empleados en la estabilización de la tierra para la producción de adobes, tapias, quinchas y BTC: desde sustancias naturales como sábila de mucilago caseína y celulosa, hasta derivados del petróleo como bitúmenes naturales y emulsiones asfálticas. Sin embargo, desde épocas ancestrales, uno de los aditivos más empleado ha sido la cal, particularmente en la construcción de muros de tapia y revoques de tierra.

A mediados del siglo XX, la industrialización de la construcción, el desarrollo de nuevos materiales y el desarrollo vertiginoso del hormigón modificaron las tendencias vigentes en cuanto al uso de materiales de construcción y los aditivos empleados en la estabilización de la tierra: el cemento Portland se convirtió en uno de los estabilizantes más utilizados, principalmente para mejorar la resistencia a compresión y durabilidad de muros de tapias y BTC. Este cambio fue influenciado en gran medida por el desarrollo de la ingeniería de caminos y el estudio del suelo cemento para ser utilizado en bases y subbases de carreteras en la década de 1930 [21].

A pesar de las buenas prestaciones que poseen los elementos constructivos de tierra estabilizados con cemento Portland, debe considerarse que, además del elevado costo económico de este aditivo, su fabricación requiere de elevados procesos de transformación térmica -alcanzándose los 1.450°C-, liberando enormes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Se estima que por cada tonelada de cemento Portland producida son liberadas a la atmósfera 0.86 toneladas de CO₂ [22].

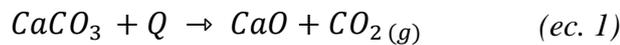
1.3.a Utilización de cal como estabilizante

1.3.a.i Algunos conceptos sobre la cal

Se conoce como cal al producto obtenido tras la calcinación de la piedra caliza -constituida mayoritariamente por carbonato de calcio- a temperaturas comprendidas entre los 900 °C y

1.000°C. En ese estado se denomina cal viva (óxido de calcio) y al *apagarla* mediante un tratamiento con agua se le denomina *cal aérea hidratada* (hidróxido de calcio).

El proceso de fabricación y empleo de la cal puede explicarse mediante las siguientes ecuaciones químicas: al calcinar el carbonato de calcio CaCO_3 (principal componente de la piedra caliza) a 900°C, este se disocia en óxido de calcio CaO o “cal viva” y dióxido de carbono $\text{CO}_2(g)$ (ec. 1). Tras hidratar el óxido de calcio CaO durante el proceso de apagado, este se convierte en hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , comúnmente conocido como cal aérea hidratada, o simplemente cal apagada (ec. 2). Finalmente, el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 expuesto a condiciones atmosféricas “endurece” por carbonatación, absorbiendo dióxido de carbono $\text{CO}_2(g)$ del aire y volviendo a formar carbonato de calcio CaCO_3 y agua como subproducto (ec. 3).



En la Figura 9 se muestra el “ciclo de la cal”, en el cual se evidencia cómo, a pesar de liberarse dióxido de carbono a la atmósfera durante el proceso de fabricación de la cal, este es reabsorbido durante el proceso de endurecimiento.



Figura 9: Ciclo de la cal. Fuente: Foro Mexicano de Construcción con Cal “FOCCAL” [23].

La presencia de arcilla en grandes proporciones dentro de la piedra caliza empleada como materia prima para la producción de cal puede modificar sustancialmente sus propiedades finales, generando cales hidráulicas que, a diferencia de las aéreas ya mencionadas, puede endurecer incluso debajo del agua. A partir de ahora, al hablar de cal en este trabajo, a menos que se indique lo contrario, se hará referencia a la cal aérea hidratada.

1.3.a.ii Utilización de cal en la estabilización

La utilización de cal como estabilizante para elementos constructivos de tierra presenta aspectos convenientes respecto al uso de cemento por los siguientes motivos:

- Su fabricación requiere menor energía, ya que la temperatura requerida para la fabricación de la cal es de aproximadamente 900 °C, requiriéndose 550 °C menos de temperatura que los requeridos para la fabricación del cemento Portland [24].
- Puede ser producida a pequeña escala y de manera artesanal [25].
- La cal aérea posee la propiedad de absorber durante su proceso de endurecimiento (carbonatación) gran parte del CO₂ liberado a la atmósfera durante su proceso de fabricación [26].
- La permeabilidad al vapor de agua de la cal es superior a la del cemento, el cual es prácticamente impermeable. Esto permite que los morteros de tierra estabilizados con cal no pierdan sus propiedades higroscópicas.

Sin embargo, y a pesar que la durabilidad de los elementos constructivos de tierra estabilizados con cal ha sido ampliamente demostrada, su resistencia mecánica -principalmente la resistencia a compresión simple- es significativamente menor que la de sus homólogos estabilizados con igual proporción de cemento Portland [27–31].

Una alternativa posible para disminuir la brecha entre los niveles de resistencia a compresión de los elementos de tierra estabilizados con cal y sus homólogos estabilizados con cemento Portland es el reemplazo parcial de cal por materiales con propiedades puzolánicas. Éstos materiales no poseen por sí mismos capacidad cementante significativa, pero molidos finamente y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, componente principal de la cal, para formar compuestos con propiedades cementantes [32].

I.3.b Utilización de materiales puzolánicos en la estabilización

I.3.b.i Materiales puzolánicos

Se entiende por materiales puzolánicos a los materiales inorgánicos silíceos o silicoaluminosos, naturales o artificiales, que se endurecen en agua cuando se mezclan con hidróxido de calcio (cal) o con materiales que pueden liberar hidróxido de calcio, como es el caso del clinker¹ de cemento Portland durante su proceso de hidratación [33]. Este endurecimiento es causado por la formación de silicatos de calcio hidratados (S-C-H) y aluminatos de calcio hidratados (A-C-H), siendo ambos los principales responsables de la resistencia y durabilidad de los morteros cementicios [34].

La norma española UNE-EN 197-1:2011 [35] indica que las puzolanas naturales son usualmente sustancias de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuada, mientras que las puzolanas industriales son arcillas y esquistos tratados térmicamente y activados; escorias de plomo, cobre y zinc refrigeradas por aire y otros productos de la industria de ferroaleaciones. Estas últimas incluyen, además, a las cenizas derivadas de la quema de cáscaras de arroz, así como escorias de varias industrias de procesamiento de metales no ferrosos [22].

Los minerales de arcilla desarrollan actividad puzolánica cuando se calcinan a temperaturas entre 600°C y 900°C. La pérdida de agua combinada durante el tratamiento térmico destruye la red cristalina de los minerales de arcilla, mientras que la sílice y la alúmina permanecen en un estado amorfo, desordenado e inestable. El calentamiento no afecta a minerales anhidros tales como cuarzo o plagioclasa, de modo que la actividad puzolánica depende únicamente del contenido mineral de arcilla y de las condiciones de tratamiento térmico [36].

I.3.b.ii Utilización de materiales puzolánicos en reemplazo de cal y cemento

Tanto los griegos como los romanos eran conscientes de que ciertos depósitos volcánicos, si estaban finamente triturados y mezclados con cal y arena, producían un mortero que no sólo poseía una resistencia superior al simple mortero de cal, sino que también era capaz de

¹ Clinker: Principal componente del cemento Portland. Se obtiene tras calcinar piedra caliza y arcillas a una temperatura de 1450°C. Luego de la calcinación se muele y mezcla con un 5% de yeso (sulfato de calcio) para producir el cemento.

endurecer bajo agua. Hoy sabemos que ese comportamiento cementicio es posible porque la ceniza volcánica aporta sílice amorfa a temperatura ambiente, la cual mezclada con el óxido de calcio CaO_2 de la cal y el agua producía silicatos de calcio hidratados S-C-H [22,37]. Este mineral amorfo es el principal responsable de la estructura interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados [38].

A diferencia de la cal, constituida prácticamente en su totalidad por hidróxido de calcio, el cemento Portland no contiene en su composición hidróxido de calcio; sin embargo, este se genera como producto secundario durante la hidratación del cemento, siendo, junto silicato de calcio hidratado (S-C-H), uno de los principales productos de su hidratación. Una vez producido, el hidróxido de calcio se encuentra disponible para reaccionar con materiales puzolánicos y formar, mediante una reacción independiente, más S-C-H [38]. Esta propiedad permite que, al igual que en la cal, el reemplazo parcial de cemento por materiales puzolánicos genere morteros de gran resistencia y durabilidad.

Cuando se realiza la incorporación de adiciones minerales -entre ellas, materiales puzolánicos- a un cemento Portland normal, se dice que se ha generado un cemento mezcla. Esta incorporación se realiza durante la molienda del cemento o mezclándolas con cemento Portland normal (cemento Portland sin adiciones) en plantas hormigoneras. En Argentina la mayor parte de la producción de cementos mezcla incorpora las adiciones en la fábrica cementera.

El primer antecedente en Argentina de los cementos con adiciones actuales se remonta a principios del siglo XX, cuando se produjo la primera mezcla de cemento Portland normal con escoria granulada de alto horno. En el año 1939 se comenzaron a utilizar, en la provincia de Mendoza, los cementos con adiciones puzolánicas para la construcción de obras hidráulicas tales como diques derivadores y canales revestidos en contacto con suelos agresivos [37].

I.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Lo mencionado hasta el momento permite formular las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Es posible fabricar BTC que cumplan los requerimientos de resistencia y durabilidad sin emplear cemento Portland como estabilizante?

2. ¿Puede la cal reemplazar al cemento Portland en la estabilización de los BTC?
3. El reemplazo parcial de cal por materiales puzolánicos en la estabilización de los BTC ¿mejora sus propiedades de resistencia y durabilidad?
4. Finalmente, ¿la estabilización de BTC con cal y adiciones minerales poseen un impacto ambiental menor al de los BTC estabilizados con cemento Portland?

I.5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

I.5.a Hipótesis de trabajo

Se planteó como hipótesis principal de la investigación la siguiente: *“La utilización de cal y materiales puzolánicos como estabilizantes para el mortero de los BTC puede reemplazar total o parcialmente al cemento Portland, sin que esto modifique las principales propiedades de resistencia y durabilidad de los bloques”*.

I.5.b Objetivos

El objetivo general de esta tesis es evaluar los efectos del reemplazo parcial de cal por materiales puzolánicos en las propiedades físicas, químicas, mecánicas y ambientales de los BTC. Para ello, se propusieron los siguientes objetivos particulares:

1. Caracterizar la materia prima disponible en el centro de la provincia de Santa Fe para la fabricación de BTC: tierra, arena, cemento, cal y adiciones minerales.
2. Determinar en función de las características propias de la materia prima disponible la relación tierra/arena/estabilizante más adecuadas para la fabricación de BTC.
3. Estudiar las reacciones químicas desarrolladas durante la estabilización de los BTC con cal y materiales puzolánicos, haciendo énfasis en la formación de compuestos cementantes, causantes del aumento de la resistencia.
4. Evaluar la resistencia a compresión, erosión húmeda y absorción de agua de los BTC estabilizados con cal y materiales puzolánicos; contrastando los resultados obtenidos con los de sus homólogos estabilizados únicamente con cal o cemento Portland.

5. Determinar mediante simulaciones el impacto ambiental de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales y compararlo con el impacto de los bloques estabilizados únicamente con cal o cemento Portland.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

II.1 LA TECNOLOGÍA DEL BTC

II.1.a Desarrollo histórico del BTC

La idea de compactar tierra para mejorar la calidad de los bloques de tierra moldeados está lejos de ser nueva, siendo los primeros BTC aquellos producidos mediante la compactación de tierra con moldes y pisones de madera [39], como puede apreciarse en la Figura 10.

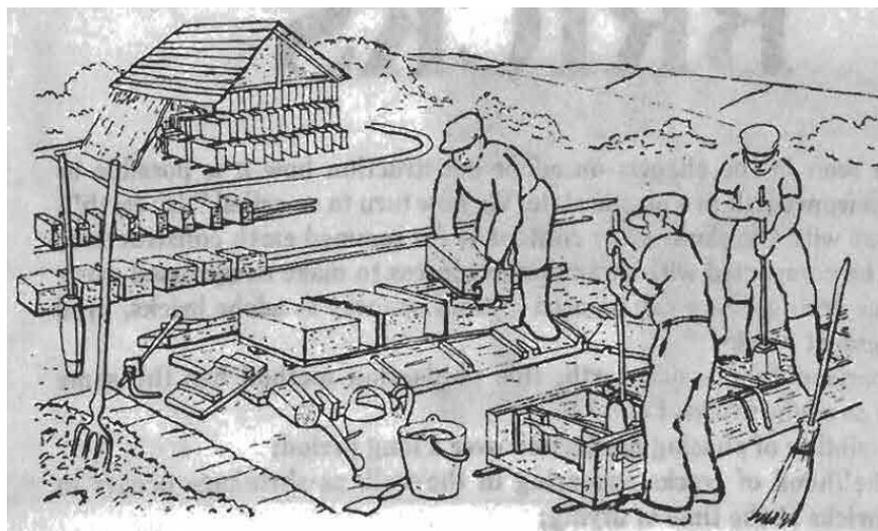


Figura 10: Compactación manual de bloques de tierra. **Fuente:** Libro "Buildings whit earth" [40].

Las primeras máquinas para comprimir tierra probablemente datan del siglo XVIII. En Francia, Francis Cointeraux, diseñó el "cresse", un dispositivo adaptado para el prensado de bloques de tierra derivado de una prensa de vino, pero no fue hasta principios del siglo XX que se diseñaron las primeras prensas mecánicas, con tapas pesadas forzadas dentro de moldes metálicos [41].

Sin embargo, el punto de inflexión en el uso de prensas y en la forma de producir bloques de tierra comprimida con fines arquitectónicos y de construcción solo tuvo efecto a partir de 1956 con la invención de la prensa CINVA-RAM, desarrollada por el ingeniero chileno Raúl Ramírez en el Centro Interamericano de Vivienda (CINVA) en Bogotá, Colombia. Actualmente, el BTC es considerado como una de las tecnologías latinoamericanas más difundidas en el mundo [18]. En la Figura 11 puede apreciarse un modelo de prensa "CINVA-RAM" fabricada en la actualidad por la empresa colombiana GracoMaq.



Figura 11: Prensa Cinva Ram. **Fuente:** GracoMaq [42].

Con posterioridad al desarrollo de la CINVA-RAM, numerosos institutos y centros de investigación de todo el mundo se abocaron al diseño y construcción de prensas propias, en su gran mayoría adaptación de la original CINVA-RAM. Tal es el caso de la prensa “Astram” desarrollada a mediados de 1970 por el Centro de Aplicación de Ciencia y Tecnología para Áreas Rurales en India; la “CETA-Ram”, diseñada y producida en 1976 por el Centro de Técnicas Apropriadas y Experimentación de Guatemala; la prensa “Brepak” desarrollada en 1980 por el Building Research Establishment en Watford (Inglaterra); la prensa francesa Geo 50 fabricada por la empresa francesa Altech a fines de los 70 y su variante italiana diseñada por el arquitecto Roberto Mattone en el Politécnico de Turín en la década del 90 [43]; o la prensa “CTA”, con capacidad para producir 3 bloques por ciclo, construida en 1982 en El Centro de Tecnología Apropriada del Paraguay [44].

En la actualidad, además de las prensas de accionamiento manual mencionadas, existen numerosas prensas automatizadas que generan la fuerza de compresión mediante sistemas de accionamiento mecánicos, hidráulicos o neumáticos, comprimiendo la tierra dentro del molde de manera estática.

II.1.b Ventajas del BTC comparado con otros mampuestos

II.1.b.i Energía incorporada durante la fabricación

La energía incorporada en la fabricación de BTC depende de numerosas variables, el tipo de prensa empleada (de accionamiento manual o automatizado), las distancias de transporte tanto de la tierra hacia la planta de producción como de los bloques producidos hasta el pie de obra, y el contenido de estabilizantes utilizados. A modo de ejemplo, se estima que el costo energético

asociado a la fabricación de BTC producidos con una prensa semiautomática de accionamiento hidráulico, estabilizados con un 14%² de cemento Portland es de 0.33 KWh/kg. Adicionando a este valor el costo energético vinculado al transporte del producto final una distancia media de 100 km, la energía finalmente incorporada es de 0.40 KWh/kg [45].

Esta estimación debe considerarse como un límite superior fácilmente mejorable a la vista de la fuerte imputación que le fue asignada al transporte. Un límite inferior puede obtenerse con facilidad: si la energía específica de la tierra cribada se reduce, la cantidad de cemento se limita al 5% y se suprime la imputación por transporte, la energía incorporada a este material puede reducirse hasta alcanzar los 0,13 KWh/kg. La energía incorporada puede reducirse aún más si se contempla la utilización de máquinas de accionamiento manual. Sin embargo, el empleo de cemento Portland impone un límite teórico a las reducciones alcanzables, que puede fijarse en torno a 0.10 kWh/kg [45].

Contrastando los costos energéticos mencionados con los asociados a otros materiales de construcción de uso común determinados por diferentes autores (Tabla 1), puede afirmarse que los BTC requieren para su fabricación una cantidad de energía menor a la precisada por los bloques de hormigón, los ladrillos comunes, los ladrillos cerámicos huecos y el hormigón monolítico, y una cantidad significativamente menor a la requerida por el acero, el aluminio y el PVC.

Tabla 1: Energía incorporada por diferentes materiales de construcción.
Fuente: Datos publicados por Vázquez Éspi [45] y Roux Gutiérrez [46].

Material / Componente	Energía incorporada (KW/kg)
BTC	0.1 – 0.4
Bloque de hormigón	0.7
Ladrillo macizo	1.25
Perfiles de acero laminado	14
Perfiles de aluminio	80
PVC	20

² Este contenido de cemento es alto, siendo lo habitual incorporar entre un 8 y 10% en volumen.

II.1.b.ii Propiedades higrotérmicas del BTC

El *coeficiente de conductividad térmica* del BTC –que cuantifica la capacidad de un material de oponerse al paso de calor a través de su masa-, a pesar de no competir con los materiales aislantes de uso frecuente como el polietileno expandido, el poliuretano o la lana de vidrio, es menor al de otros mampuestos empleados en la construcción de muros como los bloques de hormigón y ladrillos macizos. En la Tabla 2 se exponen los valores de este coeficiente indicados por la norma IRAM 11601:2004 [47] para distintos materiales empleados en la construcción, entre ellos el BTC.

Por otra parte, la *inercia térmica* es la capacidad de un material con masa de absorber y ceder la energía térmica acumulada a lo largo del tiempo. Esta propiedad se encuentra directamente relacionada con la densidad del material y su *calor específico* (cantidad de calor requerida para aumentar un grado °C la temperatura de un gramo de material) es de gran importancia en climas de amplitud térmica elevada ya que una mayor inercia térmica permitirá al muro acumular el calor adquirido durante el día y “liberarlo” durante la noche, suavizando así la variación de la temperatura en el interior de la vivienda [48]. En la Tabla 2 se muestran el calor específico y la *capacidad térmica* -directamente vinculada a la *inercia térmica*- de diversos materiales de construcción, indicados por la norma alemana DIN 4108-4:2017 [49].

Tabla 2: Densidad, coeficientes de conductividad térmica, calor específico y capacidad térmica de diferentes materiales de construcción. **Fuente:** Elaboración propia con datos de las normas IRAM 11601 [47] y DIN 4108 [49].

Material	Densidad ρ (Kg/m ³)	Conductividad térmica λ (W/m K)	Calor específico Cp (kJ/kg K)	Capacidad Térmica $\rho * C_p$ (kJ/kg K)
Hormigón	2400	1.63	1	2400
	2000	1.16	1	2000
BTC	1800	0.62	1	1800
Ladrillo macizo	1800	0.91	1	1570
	1600	0.81	0.98	980
Hormigón celular	1000	0.3	1	1000
	600	0.16	1	600
Poliuretano	45	0.0023	-	-
Polietileno expandido	20	0.035	1.5	30
Lana de vidrio	15	0.04	1	15

La inercia térmica de los BTC es superior a la de sus homólogos de menor peso como los bloques de hormigón, los bloques de hormigón celular y los ladrillos cerámicos huecos, y muy similar a la del hormigón monolítico, el ladrillo común y el adobe. Es importante comprender que, al igual que la conductividad térmica, esta propiedad no solo depende del elemento constructivo empleado en la construcción del muro, sino también en el espesor de este: a mayor espesor, menor conductividad térmica y mayor inercia térmica del mismo.

Los valores de la Tabla 2 sugieren que la construcción de muros con BTC es una alternativa digna de atención por la adecuada combinación de una baja conductividad térmica y una considerable inercia térmica.

Además de las propiedades térmicas mencionadas, una de las principales ventajas de la construcción con tierra, cualquiera sea la técnica empleada, es la capacidad de ésta de regular naturalmente -de manera parcial- la humedad del aire alojado en los ambientes interiores, siempre y cuando los muros de tierra no se encuentren revocados con morteros cementicios. Esta capacidad de modificar la humedad del aire presenta significativas ventajas en cuanto al consumo energético destinado al mantenimiento de la construcción, ya que, para lograr similares condiciones higrotérmicas dentro de edificaciones construidas con materiales convencionales como hormigón o el ladrillo macizo, y revocados con morteros cementicios, deberán incorporarse equipos deshumificadores [45].

II.1.b.iii Capacidad portante

Los BTC pueden emplearse para construir muros tanto de cerramiento como portantes. Esto se debe al hecho de que, independientemente del tipo de tierra y la prensa empleada para su fabricación, la posibilidad de incorporar estabilizantes en su producción permite aumentar su resistencia a compresión. De esta manera, si la distribución granulométrica de la tierra es adecuada (presencia de arena gruesa, arena fina, limo y arcilla) pueden obtenerse bloques con una resistencia a compresión simple superior a 25 kgf/cm^2 . Por el contrario, si la granulometría de la tierra no es la adecuada, como sucede con el suelo de la ciudad de Santa Fe (un limo arcilloso de baja plasticidad), se obtienen BTC cuya resistencia a compresión es de tan solo 8 kgf/cm^2 . Sin embargo, si a esta tierra se le adiciona un 5% de cemento Portland, según resultados publicados por diversos autores [50–52], su resistencia a compresión simple supera los 15 kgf/cm^2 ; con un 10% de cemento supera los 50 kgf/cm^2 y con un 20%, alcanza los 74 kgf/cm^2 [53].

Argentina no cuenta en la actualidad con normas técnicas específicas para la construcción con mampuestos de tierra. Sin embargo, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM y el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles “CIRSOC” han generado normas técnicas que regulan y establecen los requisitos mínimos a cumplir por diferentes tipos de mampuestos, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 3.

Es importante mencionar que en los Reglamentos CIRSOC 501 [54] y 103 [55], a pesar de no mencionarse de manera explícita al BTC, en ambos se establece que *“podrán ejecutarse muros con materiales distintos a los especificados en el Capítulo II (ladrillos cerámicos macizos o huecos y bloques de hormigón) siempre y cuando estos nuevos materiales cumplan como mínimo con los requisitos establecidos para los materiales o componentes especificados por dichos reglamentos”*.

Tabla 3: Resistencias mínimas a compresión estipuladas por las normas argentinas en mampuestos.

Fuente: Elaboración propia.

Norma	Año	Ref.	Mampuesto	Función estructural	Resistencia solicitada (kgf/cm ²)
IRAM 12566-1	2005	[56]	Ladrillo macizo	Portante	40
IRAM 12566-2	2005	[57]	Ladrillo cerámico hueco ⁽¹⁾ y perforado ⁽²⁾	Cerramiento ⁽¹⁾ Portante ⁽²⁾	15 ⁽¹⁾ 40 ⁽²⁾
IRAM 11561-2	2018	[58]	Bloque de hormigón no portante	Cerramiento	25
IRAM 11561-3	2012	[59]	Bloque de hormigón portante	Portante	60
IRAM 1701-1	2003	[60]	Bloques de hormigón celular curado en autoclave (según la densidad)	Cerramiento	20 – 80 según la densidad
CIRSOC 501	2007	[54]	Bloque de hormigón ⁽¹⁾ y ladrillo cerámico, hueco ⁽²⁾ y macizo ⁽³⁾	Portante ^{(1) (2) (3)}	55 ⁽¹⁾ 55 ⁽²⁾ 50 ⁽³⁾
CIRSOC 103-3	2016	[55]	Bloque de hormigón ⁽¹⁾ y ladrillo cerámico, hueco ⁽²⁾ y macizo ⁽³⁾	Portante ^{(1) (2) (3)}	55 ⁽¹⁾ 55 ⁽²⁾ 50 ⁽³⁾

Si se comparan los valores de esta tabla con las resistencias a compresión alcanzadas por los BTC estabilizados con cemento, se aprecia como éstos pueden emplearse en muros portantes y de cerramiento sin ningún tipo de riesgo estructural.

II.1.b.iv Posibilidad de escalado y precio de venta

Una de las principales características de la producción de BTC es su posibilidad de escalado (incremento en la escala de producción), pudiendo ser fabricados en emprendimientos de muy pequeña escala -alcanzando con un mínimo de capacidad instalada una producción media diaria de 200 a 300 BTC/día con 3 operarios- y en grandes fábricas con altos grados de automatismo, consiguiéndose un nivel de producción de hasta 5.000 BTC/día. Esta versatilidad permite que sean utilizados en casos aislados de autoconstrucción, en proyectos de producción social del hábitat, planes estatales de vivienda e incluso emprendimientos inmobiliarios del sector privado.

Además, desde el punto de vista económico, trabajos realizados por el Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN-FRSF [61] en 2019 demostraron que es posible fabricar BTC a gran escala con un precio de venta de USD 0.30 por unidad. Comparando este precio con el del tradicional ladrillo macizo (USD 0.19), el bloque portante de hormigón (USD 0.83), el ladrillo cerámico portante (USD 0.81) o el bloque de hormigón celular (USD 1.72), puede advertirse que el precio de venta de estos mampuestos resulta competitivo en el mercado nacional.³

II.2 ANTECEDENTES PRINCIPALES

En el contexto internacional existen numerosas publicaciones y líneas de investigación específicas sobre las diferentes técnicas de construcción con tierra y en particular, sobre la tecnología del BTC, pudiendo encontrarse libros de texto, proyectos finales de carrera, tesis doctorales y de maestría, artículos publicados en revistas científicas y artículos publicados en congresos de alcance internacional.

II.2.a Publicaciones sobre BTC

En lo que respecta a la publicación de libros de texto específicos sobre las diferentes técnicas de construcción con tierra debe destacarse la tarea realizada por el Centre International de la Construcción en Terre de la École Nationale d'Architecture de Grenoble – “CRATerre EAG”, entre cuyos títulos se destacan “Earth Construction Technology” [62] y “Building with earth” [63],

³ Estos valores corresponden al mes de julio de 2019 (1 USD = \$57,00) en el contexto argentino y del mercado convencional de la construcción.

ambos con capítulos específicos sobre la tecnología de construcción con BTC. Además, CRATerre cuenta con publicaciones específicas sobre métodos de ensayo [64], normativas [65], selección de equipamiento [66] y elementos básicos de diseño con este tipo de bloques [67]. Finalmente, deben mencionarse los manuales de producción, diseño y construcción con BTC redactados de manera conjunta por CRATerre-EAG y el Centro Alemán para la Tecnología y Desarrollo [41,68]; y el Libro “Técnicas de Construcción con Tierra” publicado por la Red Iberoamericana PROTERRA [11], con un capítulo específico abocado a la fabricación y construcción con BTC.

Dentro de las tesis doctorales publicadas en los últimos años, son dignas de mención las desarrolladas por la Dra. Yolanda Aranda en la Universidad Autónoma de Tamaulipas (México) [69] -en la cual se estudian las características físicas de los BTC aditivados con diferentes proporciones mucilago de nopal y sábila incorporadas en el agua de mezclado-, la tesis del Dr. Jaime Cid Falceto por la Universidad Politécnica de Madrid [70] sobre los diferentes métodos de ensayo empleados por la normativa internacional para evaluar la durabilidad de los BTC y la desarrollada en la Université d’Artois (Francia) por Cédric Flamen en la cual se estudia la posibilidad de emplear el material de descarte generado en las canteras de áridos, para la fabricación de bloques de tierra comprimida [71]. En el año 2015, en el marco de una Tesis de Maestría por la Universidad Nacional de Colombia, Olga Yepes Gaviria y Oscar Vedoya Monya publican un extenso estudio sobre la posibilidad de utilizar procesos de geopolimerización en la estabilización de bloques de tierra comprimida, ampliamente utilizados en su país [72].

En lo que respecta a Proyectos Finales de Carrera, deben destacarse los titulados “Producción de bloques eco modulares de suelo cemento en Argentina” [73] e “Investigación sobre el uso de Bloques de Tierra Compactada (BTC). Su aplicación en el Centro Comunitario Casas Viejas” [74], en los cuales se estudia la factibilidad técnica y económica de la producción a gran escala de este tipo de mampuestos en Argentina y su aptitud para ser empleados en proceso de autoconstrucción asistida en la provincia de Tucumán; además del denominado “Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción” [27] desarrollado en la Universidad Pública de Navarra, en el cual se estudia la viabilidad de emplear cal y cenizas de cáscara de arroz para la estabilización de BTC.

Considerando las investigaciones sobre BTC publicadas en los últimos 10 años en revistas científicas de alto impacto, es recurrente la temática abordada: la incorporación de diversos

materiales y aditivos estabilizantes como reemplazo parcial o total del “tradicional” cemento Portland y el estudio de su efecto en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los bloques. Dada la gran diversidad de artículos publicados al respecto, se destina un apartado especial para estos.

II.2.b Materiales empleados en la estabilización de BTC

Como ya fue mencionado en el Capítulo I en relación con la durabilidad y el mantenimiento apropiado a lo largo del tiempo de las construcciones de tierra, en función de mejorar las resistencias mecánicas y el desempeño frente al deterioro producido por la acción de agentes climáticos en las construcciones, es conveniente el uso de estabilizantes.

Se entiende por estabilizante a cualquier sustancia o aditivo que, incorporada a la tierra, mejora significativamente alguna de sus propiedades. De esta manera, la incorporación de fragmentos de paja u otras fibras vegetales reduce la retracción generada durante el secado del mortero; la adición de aceites vegetales y emulsiones asfálticas disminuye significativamente la permeabilidad de la tierra, mejorando su durabilidad. La incorporación de aglomerantes – generalmente cal y cemento- produce aumentos considerables de la resistencia mecánica y mejora la durabilidad [20].

En lo que respecta a la estabilización de BTC, diversos aditivos han sido empleados para este fin: desde sustancias naturales como sábila de mucilago [75], caseína y celulosa [76], hasta derivados del petróleo como bitúmenes naturales y emulsiones asfálticas [77], además de fibras de diversos tipos. Actualmente pueden encontrarse estudios sobre la utilización de fibras naturales como las de banana [78], coco [79] yute [80], arroz [27,81] y pelo de cerdo [82]; como así también artificiales como las microfibras plásticas de polipropileno [83]. Recientemente Chiara Turco *et al.*, con el objetivo de ofrecer una visión más clara de los desarrollos científicos recientes sobre la estabilización de BTC con materiales de origen natural, han realizado una revisión sistemática de la literatura disponible y publicado un artículo en el cual se menciona el amplio espectro de materiales añadidos a los BTC con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas [84].

II.2.b.i El cemento Portland

A mediados del siglo XX, la industrialización de la construcción, el desarrollo de nuevos materiales y el auge del hormigón modificaron las tendencias vigentes en cuanto al uso de materiales de construcción y los aditivos empleados: el cemento Portland se convirtió en uno de los estabilizantes más utilizados; tal es el caso que la popularización de la tecnología del BTC se encuentra directamente vinculada a la estabilización de suelos con cemento Portland: la prensa Cinva Ram, desarrollada en Colombia a comienzos de los años '50 fue pensada para la fabricación *in situ* de "bloques comprimidos de suelo-cemento" [85,86]. Incluso en la actualidad, las normas técnicas de países como Brasil [87] y Colombia [88] consideran al cemento Portland como el único estabilizante apto para la fabricación de BTC.

Hoy en día, numerosas investigaciones de Argentina [52,89,90] y otros países [78,91–94] siguen ratificando la aptitud del cemento Portland como estabilizante en la producción de BTC, siendo uno de los principales objetivos determinar el contenido mínimo de este -en función del tipo de suelo disponible- que garantice las prestaciones mínimas de seguridad estructural y durabilidad de los muros construidos con estos mampuestos. En las investigaciones citadas se emplean contenidos de cemento que oscilan entre el 5 y el 15% del peso total de los bloques, indicando todas ellas que, a mayor contenido de cemento, mayor resistencia mecánica (especialmente a compresión) y durabilidad.

II.2.b.ii La cal

Otro estabilizante mineral frecuentemente empleado en la fabricación de BTC es la cal (aérea o hidráulica), utilizada además en la construcción de muros de tapial y revoques de tierra estabilizada. La acción de la cal en la estabilización del suelo preponderantemente arcilloso puede advertirse en dos etapas: en una primera etapa, casi inmediata a la incorporación de la cal, se produce una reducción del índice de plasticidad del suelo por incremento de su límite plástico, lo cual lo vuelve menos sensible a los efectos perjudiciales del agua y, particularmente, a los cambios volumétricos. Ya en edades más avanzadas -a partir de las 8 semanas desde el momento de la estabilización- se produce un significativo aumento de la resistencia mecánica del suelo, lo cual se atribuye a la formación de nuevos compuestos cementantes (silicatos de calcio y aluminatos de calcio hidratados) al recombinarse los iones de calcio aportados por la cal con los minerales arcillosos del suelo [41,95,96].

Numerosos investigadores han evaluado las propiedades físicas de los BTC estabilizados únicamente con cal, tanto en el contexto nacional [30,97] como internacional [29,46,50,98–103], reportándose en los casos en que fueron comparadas las resistencias de los BTC estabilizados con cal con sus homólogos estabilizados únicamente con cemento Portland, menores resistencias [29,30,99]. En este sentido, es importante mencionar el caso de la norma técnica mexicana NMX C 508:2015 [104] que estipula los métodos de ensayo y requisitos mínimos a cumplir por los BTC, estabilizados únicamente con cal.

II.2.b.iii Combinación de cal y cemento

Una práctica muy habitual en la fabricación de BTC es la utilización combinada de cal -aérea o hidráulica- con cemento Portland. Existen diferentes motivos por el cual esta combinación de estabilizantes minerales puede emplearse, siendo el principal en Argentina la “recomendación” de los fabricantes de prensas y equipos auxiliares, quienes informan una mejora significativa en el comportamiento mecánico de los Bloques al incorporar “media parte de cal por cada parte de cemento” empleado como estabilizante, concepto adoptado de la ingeniería de caminos, en la cual suelen emplearse pequeños contenidos de cal para elevar el pH de suelos arcillosos a entornos cercanos a 12.4 para mejorar su comportamiento [105]. El efecto de esta combinación de aglomerantes en la estabilización de los BTC fue ampliamente estudiada por H.B. Nagaraj [28,106] y Malkanthi *et al* [31] quienes determinaron que el mayor aporte de esta combinación de estabilizantes, además del incremento de la resistencia respecto a la utilización únicamente de cal, es en el aumento de las resistencias a largo plazo de los bloques.

II.2.b.iv Materiales puzolánicos en la estabilización

Numerosos investigadores han estudiado el efecto de la incorporación de adiciones minerales obtenidas generalmente como subproducto de procesos agroindustriales en la estabilización de BTC, las cuales son incorporadas como adición o reemplazo parcial del cemento Portland aprovechando el desarrollo de las denominadas “reacciones puzolánicas”. Un ejemplo de esto es el trabajo de Lima *et al.*, quienes estudiaron el efecto de la incorporación de cenizas de caña de azúcar en BTC estabilizados con 6 y 12% de cemento Portland, determinando que la incorporación de estas cenizas no afectó la resistencia mecánica ni la absorción de agua de los BTC [39]; o María Laguna, quien evaluó la resistencia a compresión seca y saturada, la absorción de agua y resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo de BTC estabilizados con cenizas de

cáscara en combinación de cal o cemento Portland, advirtiendo que es factible su utilización en muros portantes [27].

Deben mencionarse además los numerosos estudios publicados recientemente en los cuales se realiza un proceso de geopolimerización o “activación alcalina” de diversos materiales puzolánicos como las cenizas volantes [107–109], la escoria de alto horno [110] y el metacaolín [111] en la estabilización de BTC, en la mayoría de los casos, como reemplazo parcial del cemento.

II.3 MARCO NORMATIVO DE LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA EN EL MUNDO

Numerosos países cuentan hoy con normas técnicas específicas para la construcción con tierra, siendo ejemplificador el conjunto de normas neozelandesas [112–114], el código de edificación del Estado de Nuevo México en Estados Unidos [115] y el Australian Earth Building Handbook [116] -redactado por el organismo nacional de normalización de Australia- por comprender desde los requisitos de los materiales de construcción hasta cuestiones de diseño estructural y durabilidad de las edificaciones, tanto para técnicas de adobe como BTC y tapial.

En su estudio sobre la normativa de construcción con tierra en el mundo Cid Falceto [117] analizó 56 documentos técnicos publicados por organismos oficiales de normalización y organismos competentes de 17 países y sus conclusiones se sintetizan a continuación:

- *Gran parte de los documentos publicados por organismos oficiales de normalización centran su contenido en el estudio de una única técnica constructiva, ya sea adobe, BTC o tapial, siendo la técnica del BTC la de mayor recurrencia.*
- *En la mayoría de las normas estudiadas se recomienda agregar agentes estabilizadores (cemento, cal o asfalto) para mejorar las características mecánicas, de durabilidad y de estabilidad de la tierra, aunque no es siempre imprescindible, ya que muchos suelos pueden alcanzar un comportamiento satisfactorio sin necesidad de ningún estabilizante.*
- *En la totalidad de las normas se encuentran referencias a la selección de los suelos, aunque los planteamientos en cada uno de los documentos son diferentes.*
- *Las normativas de edificación con tierra son bastante autónomas, sin referenciarse o apoyarse en otras normas de construcción reglamentadas en el país. En muchos casos se*

describen procedimientos de ensayos propios para técnicas de construcción con tierra, como los ensayos de erosión húmeda, aunque también se encuentran muchas referencias a normas nacionales de otros campos del conocimiento, sobre todo en lo referente a preparación y clasificación de suelos.

- El documento más amplio y completo es el trio de normas neozelandesas, el cual comprende desde requisitos de materiales y construcción a cuestiones de diseño estructural y de durabilidad de las edificaciones de tierra, tanto para adobe como para bloque de tierra comprimido y tapial. Además, presenta un modelo equiparable al enfoque actual que se da a otros materiales de construcción: buena definición de las técnicas objeto, abundante desarrollo de todas las fases del proceso para las tres técnicas principales y descripción minuciosa de los procedimientos de ensayo propuestos.
- En todas las normas se contempla fundamentalmente el empleo de los muros de tierra como muros resistentes, que además podrían utilizarse como no resistentes y paredes monolíticas sin función estructural.

En la Tabla 4 se indican las normas estudiadas por Cid Falceto en su artículo, sobre las cuales se añadieron las normas actualmente vigentes en otros países que fueron publicadas con posterioridad. En dicha Tabla se indican además las técnicas de construcción con tierra abordadas por cada documento y el tipo de contenido que presentan.

Tabla 4: Normas técnicas sobre construcción con tierra en el mundo.
Fuente: Cid Falceto *et al* [117], actualizada y adaptada por Santiago Cabrera.

País	Norma/ reglamento	Organismo	Técnica				Contenido				
			Adobe	BTC	Tapia	Selec. Suelos	Requisitos	Ensayos	Fabricación	Construcción	Diseño
Alemania	D0111:1994 ^(*)	SIA	X	X	X	X	X		X	X	
Australia	HB 195:2002 ^(*)	Standards Australia									
Brasil	NBR 8491:1986	ABNT		X		X	X				
	NBR 8492:1986			X				X			
	NBR 10832:1989			X		X				X	
	NBR 10833:1989			X		X				X	
	NBR 10834:1994			X		X	X	X			

	NBR 10835:1994			X			X				
	NBR 10836:1994			X				X			
	NBR 12023:1992							X			
	NBR 12024:1992							X			
	NBR 12025:1990							X			
	NBR 13554:1996							X			
	NBR 13555:1996							X			
	NBR 13553:1996					X	X				
	PN 002:123.9: 2016(*)		X			X	X	X			
Chile	NCh3332:2013(*)	INN	X					X		X	
Colombia	NTC 5324:2004	ICONTEC		X		X	X	X			
EEUU	NMAC 14.7.4:2004	CID	X	X	X	X	X	X		X	
	ASTM E2392 M-10	ASTM	X		X	X		X	X	X	
El Salvador	RTS 91.02.01:2014(*)	OSRT	X			X	X	X		X	X
España	UNE 41410:2008	AENOR		X		X	X	X			
Francia	XP P13-901:2001	AFNOR		X		X	X	X			
India	IS 2110:1980	BIS			X	X	X			X	
	IS 1725:1982	BIS		X		X	X	X			
	IS 13827:1993	BIS	X		X		X			X	
Italia	Ley N°378:2004		X	X	X						
	L.R 2/06 2: 2006		X	X	X						
Kenya	KS 02-1070:1999	KEBS		X		X	X	X			
Marruecos	RPCT 2011(*)	ROYAUME DU MAROC	X		X	X	X	X	X	X	X
México	NMX-C-508:2015(*)	ONNCCCE		X		X	X	X			
Nigeria	NIS 369:1997	SON		X							
Nueva Zelanda	NZS 4297:1998		X	X	X					X	X
	NZS 4298:1998	SNZ	X	X	X	X	X	X	X	X	
	NZS 4299:1998		X	X	X					X	X
Perú	NTE E 080:2017(*)	SENCICO	X			X	X	X	X	X	X
	NTP 331.201:1979		X				X	X	X		
	NTP 331.202:1979	INDECOP	X			X					
	NTP 331.203:1979		X				X				
Regional Africana	ARS 670:1996	ARSO		X		X					
	ARS 671:1996			X							

	ARS 672:1996		X							
	ARS 673:1996		X							
	ARS 674:1996		X	X	X					
	ARS 675:1996		X	X	X					
	ARS 676:1996		X		X					
	ARS 677:1996		X		X	X				
	ARS 678:1996		X						X	X
	ARS 679:1996		X						X	X
	ARS 680:1996		X	X				X		
	ARS 681:1996		X	X				X		
	ARS 682:1996		X						X	
	ARS 683:1996		X	X	X					
Sri Lanka	SLS 1382-1:2009	SLSI	X	X	X					
	SLS 1382-2:2009		X			X				
	SLS 1382-3:2009		X				X	X	X	
Túnez	NT 21.33:1996	INNOPRI	X		X	X				
	NT 21.35:1996		X		X					
Turquía	TS 537:1985	TSE	X	X						
	TS 2514:1985		X							
	TS 2515:1985		X							
Zimbabue	SAZS 724:2001	SAZ			X	X	X	X		X

(*) No incluidas en la publicación de Cid Falceto *et al* [117].

II.4 MARCO NORMATIVO DE LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA EN ARGENTINA

Argentina presenta una larga tradición constructiva con tierra, sin embargo, carece de normativas que reglamenten su desarrollo hasta el momento, contando apenas con algunas regulaciones municipales imprecisas. Por el contrario, los antecedentes de los catastróficos sismos de 1944 y 1977 en la provincia de San Juan han generado que los organismos oficiales desalienten su empleo. A estos antecedentes se suman los problemas sanitarios derivados de la enfermedad de Chagas-Mazza, que aún persisten en ciertos sectores del ámbito rural argentino, vinculado a las construcciones precarias y mal ejecutadas de todo tipo de tecnología y materialidad. Estas cuestiones han incrementado el prejuicio del empleo de la tierra como material de construcción en la esfera estatal [118,119]. Sin embargo, su larga trayectoria y

acelerado desarrollo tecnológico están permitiendo resolver estos inconvenientes y favorecer construcciones más seguras y sanas, además de ambientalmente más sostenibles [120].

II.4.a Normas jurídicas

En Argentina actualmente no existe una reglamentación nacional referida a construcciones con tierra e incluso, la mayoría de las ordenanzas y códigos de edificación municipales no tienen en cuenta las técnicas de construcción con tierra o directamente, la prohíben. La carencia de una reglamentación nacional acarrea dos importantes problemas: la falta de regulación sismorresistente y la ausencia de instrumentos que faciliten y permitan su desarrollo tecnológico. Las primeras acciones que buscan revertir la situación se limitan a la formulación y sanción de ordenanzas en distintos municipios para habilitar la construcción con tierra o declaraciones de interés provinciales que buscan resguardar el patrimonio construido. Estas acciones se inician en 2008, pero es a lo largo de la última década que surgen la casi totalidad de las normas jurídicas y/o técnicas actualmente vigentes [121].

En el año 2020, la comisión de Normativas de la Red Argentina de Construcción con Tierra, PROTIERRA realizó un detallado informe sobre la situación normativa en el país [122], analizando 41⁴ documentos (Tabla 5) entre normas jurídicas y técnicas vigentes de construcción con tierra en el territorio nacional, entre las que se distinguen: Ordenanzas Departamentales, Municipales y Comunes, Leyes provinciales, Decretos o Resoluciones Municipales y modificaciones reglamentarias en los Códigos de Edificación. En dicho informe, se dieron a conocer los siguientes resultados: El 60% no contienen informaciones que pueda ser considerada como anexo técnico, el 30% cuentan con algún tipo de anexo con referencias prácticas más o menos detalladas respecto al uso de las técnicas que se autorizan y tan solo en el 10% de documentos consultados (Chajarí, Lavalle, El Bolsón y Oliveros) los anexos técnicos tienen un nivel de profundidad superior, considerando incluso elementos de normas técnicas internacionales.

⁴ Las ordenanzas de Paraná y Santa Fe no fueron relevadas por la Comisión de Normativas por ser sancionadas con posterioridad a la publicación de su trabajo; sin embargo, se las incluye en la Tabla 5.

Tabla 5: Listado de Regulaciones de la Construcción con Tierra en Argentina.
Fuente: Red PROTIERRA Argentina [121], adaptada y actualizada por Santiago Cabrera.

N°	Localidad	Provincia	Regulación
1	Ayacucho	Buenos Aires	Ordenanza N° 4765/13
2	Bahía Blanca	Buenos Aires	Ordenanza N° 184/11
3	Coronel Suárez	Buenos Aires	Ordenanza N° 5554/12
4	General Alvarado	Buenos Aires	Ordenanza N° 223/16
5	Mar del Plata	Buenos Aires	Ordenanza N° 22690/16
6	Marcos Paz	Buenos Aires	Ordenanza N° 50/16
7	Olavarría	Buenos Aires	Ordenanza N° 3753/15
8	Pergamino	Buenos Aires	Ordenanza N° 8286/15
9	Tandil	Buenos Aires	Ordenanza N° 16781/19
10	Tigre	Buenos Aires	Ordenanza N° 3345/13
11	Tornquist	Buenos Aires	Ordenanza N° 6590/14
12	Villarino	Buenos Aires	Ordenanza N° 2747/14
13	El Hoyo	Chubut	Ordenanza N° 111/13
14	Esquel	Chubut	Ordenanza N° 111/14
15	Río Cuarto	Córdoba	Ordenanza N°981/18
16	Salsipuedes	Córdoba	Artículo N° 211 del Código de Edificación
17	Villa del Dique	Córdoba	Ordenanza N°892/2018
18	La Serranita	Córdoba	Resolución N°19/18
19	Entre Ríos	Entre Ríos	Ley provincial N° 10.736
20	Chajarí	Entre Ríos	Ordenanza N° 1677/16
21	Paraná	Entre Ríos	Ordenanza N° 9888/19
22	Santa Rosa	La Pampa	Ordenanza N° 5320/15
23	Winifreda	La Pampa	Ordenanza N° 426/13
24	Chilecito	La Rioja	Ordenanza N° 3484/17
25	Las Heras	Mendoza	Ordenanza N° 45/16
26	Lavalle	Mendoza	Ordenanza N° 889/2014
27	Neuquén	Neuquén	Ordenanza N° 13489/16
28	Neuquén	Neuquén	Decreto N°55/18
29	Plottier	Neuquén	Ordenanza N° 4041/19
30	Rincón de los Sauces	Neuquén	Ordenanza N° 1278/11
31	San Martín de los Andes	Neuquén	Ordenanza N° 9409/12
32	Río Negro	Río Negro	Ley N° 4931/2013
33	San Carlos de Bariloche	Río Negro	Ordenanza N° 2492/13

34	Cipolletti	Río Negro	Ordenanza N° 210/13
35	El Bolsón	Río Negro	Ordenanza N° 162/10
36	Luis Beltrán	Río Negro	Ordenanza N° 24/10
37	Río Colorado	Río Negro	Ordenanza N° 1777/15
38	Cachi Salta	Salta	Resolución N° 504/12
39	Merlo	San Luis	Ordenanza N° 0552/13
40	El Calafate	Santa Cruz	Ordenanza N° 1980/17
41	Oliveros	Santa Fe	Ordenanza N° 1082/14
42	Reconquista	Santa Fe	Ordenanza N° 73632/13
43	Santa Fe de la Vera Cruz	Santa Fe	Ordenanza N° 12783/21

En las conclusiones del informe, la comisión realiza las siguientes observaciones:

- *Cuando se hacen referencias a considerar documentos nacionales, se indica que la construcción con tierra debe realizarse siempre y cuando su empleo no contradiga las exigencias de los Códigos de Edificación, las normas CIRSOC⁵ y/o las recomendaciones del INPRES⁶. En este contexto, solo las técnicas de entramado como la quincha han prosperado en los municipios con mayores índices de sismicidad, pero ajustándose a los marcos restrictivos correspondientes.*
- *Prácticamente no se observaron indicaciones, exigencias ni comentarios respecto de clasificación y control de calidad de los materiales, la capacitación de la mano de obra, la práctica profesional y protocolos de ensayo para la construcción con tierra.*
- *Se ha determinado una gran dispersión de términos empleados sobre las técnicas de construcción, en muchos casos para referirse a lo mismo, que favorece a la confusión generalizada sobre este tipo de técnicas constructivas.*
- *En ninguno de los documentos analizados se considera la arquitectura con tierra existente y patrimonial en su reglamentación.*

Finalmente, este documento concluye que el mayor obstáculo para el desarrollo de la tecnología de construcción con tierra en Argentina y su extensión en todo el territorio radica en la falta de un reglamento nacional que regule integralmente la actividad.

⁵ Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, dependiente del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (Argentina).

⁶ Instituto Nacional de Prevención Sísmica (Argentina).

II.4.b Normas técnicas

II.4.b.i Normas para la construcción de muros de mampostería

Como fue mencionado anteriormente, Argentina no cuenta con reglamentos o normas técnicas nacionales específicas para la construcción con tierra. Sin embargo, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM ha generado normas técnicas que regulan y establecen los requisitos mínimos a cumplir por diferentes tipos de mampuestos: ladrillos cerámicos macizos [56] , ladrillos cerámicos huecos y perforados [57], bloques de hormigón portante [59] y no portante [58] y bloques de hormigón celular curados en autoclave [60].

Apoyándose en las normas aprobadas por IRAM, el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles CIRSOC, dependiente del Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI, en conjunto con el Instituto Nacional de Prevención Sísmica INPRES, han redactado 2 Reglamentos [54,55] que establecen los requisitos que deben cumplir los diferentes mampuestos y los métodos de cálculo y diseño de estructuras de mampostería sismoresistentes. Se remarca el hecho de que, a pesar de no mencionarse de manera explícita al BTC en los Reglamentos CIRSOC, ambos establecen que “podrán ejecutarse muros con materiales distintos a los especificados en el Capítulo II (ladrillos cerámicos macizos o huecos y bloques de hormigón) siempre y cuando estos nuevos materiales cumplan como mínimo con los requisitos establecidos para los materiales o componentes especificados por dichos reglamentos”.

II.4.b.ii Avances en la normalización de la construcción con tierra en Argentina

Con intenciones de avanzar en la redacción de un reglamento nacional para la construcción con Tierra, la Comisión de Materiales y Sistemas Constructivos de la Red PROTIERRA publicó en noviembre del 2020 su “Protocolo de ensayos sobre elementos constructivos para la construcción con tierra”, el cual reúne en un documento único los procedimientos de ensayo a realizar sobre elementos constructivos de tierra para evaluar su resistencia y durabilidad [123]. Para la confección de esta propuesta de protocolo se han empleado como referencia normas argentinas confeccionadas por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) y Vialidad Nacional, como así también normas internacionales específicas para la construcción con tierra. Este documento propone métodos de ensayo para adobes, bloques de tierra comprimida (BTC), tapia, morteros de asiento, y revoques.

II.5 DESARROLLO DEL BTC EN ARGENTINA

El desarrollo técnico de la construcción con BTC en Argentina cuenta con una larga trayectoria, remontándose los primeros antecedentes a las obras realizadas por el Instituto del Cemento Portland Argentino en la década de 1940, incluso antes de la invención de la prensa CINVA-RAM [124]; sin embargo, su empleo se intensificó durante los años 80, motivado por el inicio de su investigación en ámbitos científicos y académicos y su utilización en la construcción de viviendas rurales impulsadas por organismos estatales [125]. Estas cuestiones conforman la base de una amplia gama de documentos publicados posteriormente sobre aspectos técnicos del mampuesto y experiencias de transferencia tecnológica.

Actualmente en Argentina, las obras construidas con BTC incluyen barrios de viviendas FONAVI, viviendas particulares y financiadas por créditos del programa PROCREAR, edificios destinados a la prestación de servicios de todo tipo (salones comunitarios, centros culturales, museos, puestos de salud, oficinas, depósitos y escuelas) y edificios turísticos como cabañas, posadas, y hoteles.

En trabajos realizados de manera conjunta por Investigadores de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán y el Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN FRSF se han detectado al menos 82 agentes vinculados al proceso de producción del BTC en Argentina [126,127]. Asimismo, un relevamiento realizado por investigadores de la UTN FRSF [127] indicó que actualmente en Argentina existen al menos 26 emprendimientos (de variada envergadura y nivel de desarrollo) dedicados a la fabricación y construcción con BTC, distribuidos en todo el territorio nacional con excepción de la región patagónica y cuyana. En lo que respecta a la fabricación de prensas y equipos auxiliares para la fabricación de estos bloques (moledoras de tierra, zarandas y mezcladoras) pudieron relevarse en el país 7 empresas metalúrgicas abocadas a la tarea, las cuales se encuentran radicadas en las provincias de Tucumán, Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires.

Sin embargo, a pesar de los numerosos antecedentes de utilización de BTC en Argentina, se observa aún la persistencia de numerosos inconvenientes que dificultan el escalado de sus procesos de producción, su difusión, comercialización y transferencia, como así también los procesos adecuados para generar condiciones de vinculación tecnológica y la apropiación de esta tecnología [120].

II.5.a Investigación y transferencia

El sector académico en Argentina viene desarrollando desde hace ya 20 años un gran número de actividades de investigación, enseñanza y transferencia tecnológica centradas en el desarrollo técnico del BTC [126]. Los centros universitarios involucrados en la investigación y enseñanza se ubican principalmente en las provincias de Tucumán, Santa Fe, San Juan y Salta. En Tucumán, se han registrado trayectorias de 25 años de desarrollo, interviniendo tres grupos distintos de la Universidad Nacional de Tucumán. En Santa Fe, la actividad se ha desarrollado en la Universidad Tecnológica Nacional, en sus sedes regionales de Santa Fe y Venado Tuerto, con trayectorias de 20 años. En San Juan, la actividad ha sido tomada por el Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat. En Salta, las investigaciones han sido llevadas a cabo por un grupo de investigadores de la Universidad Católica de Salta. Estos mismos centros han realizado actividades de transferencia tecnológica con organizaciones sociales y asesoramiento técnico a pequeñas y medianas industrias. En estas actividades de transferencia también se pueden considerar dos grupos perteneciente a la Universidad de Buenos Aires y a la Universidad Nacional de Mar del Plata, que han realizado actividades de transferencia conjuntamente desde hace 12 años, pero sin estar involucrados de manera directa en el desarrollo técnico. En la Universidad Nacional de La Rioja se han realizado actividades de enseñanza y transferencia.

En la Tabla 6 se indica la base de datos de producción científica de los últimos 20 años conteniendo 48 documentos identificados, integrado por artículos, presentaciones a congresos y tesis. Se observa una equilibrada producción entre temas vinculados a investigación (26) y transferencia tecnológica (22), pero con perfiles distintos según cada provincia. Los centros de investigación de Tucumán, Santa Fe y Buenos Aires concentran el 85% de la producción total a lo largo del período señalado.

Tabla 6: Base de datos de producción científica nacional sobre la tecnología de BTC.

Fuente: Dorado *et al.* [125], actualizada y adaptada por Santiago Cabrera.

N°	Recurso	Tipo	Provincia	Autores
1	Centro Regional de Investigaciones de Tierra Cruda. Sistema Constructivo "LAMARS"	Congreso	Tucumán	Mellace et al., 2002
2	Control de la absorción de agua en bloques comprimidos de suelo-cemento	Congreso	Tucumán	Arias et al., 2003
3	Optimización de mezclas de suelo-cemento para la producción de BTC	Congreso	Tucumán	Arias et al., 2004a
4	Variación de la resistencia del BTC según distintos estados hídricos	Congreso	Tucumán	Arias et al., 2004b
5	Proyecto de construcción de aldeas rurales escolares	Congreso	Santa Fe	González et al., 2004
6	Capacitación y gestión participativa para fabricar bloques de tierra comprimida. Bancalari, Buenos Aires	Congreso	Buenos Aires	Rotondaro et al., 2004
7	Mampostería con tierra estabilizada comprimida	Congreso	Tucumán	Alderete et al., 2006
8	Diseño y análisis estructural de componentes constructivos con tierra cruda	Congreso	Tucumán	Arias et al., 2006
9	Ladrillos de suelo-cemento elaborados con suelos superficiales y barros de excavación para pilotes	Congreso	Santa Fe	Begliardo et al., 2006
10	Construcción de bóveda de cañón corrido con tierra estabilizada	Congreso	Tucumán	Ferreyra et al., 2006
11	Aportes a la tecnología para la fabricación del BTC	Congreso	Salta	Galindez, 2006
12	Experimentación tecnológica en aldeas rurales	Congreso	Santa Fe	González et al., 2006
13	La verdecita, un encuentro urbano entre la universidad y el pueblo	Congreso	Santa Fe	Pautasso et al., 2006
14	Una década en la enseñanza de la construcción en tierra cruda	Congreso	Salta	Polliotto y Galindez, 2006
15	Elaboración de bloques de suelo-cemento con barros de excavación para pilotes	Congreso	Santa Fe	Sánchez et al., 2008
16	Bloques de tierra comprimidos (BTC) sin adición de cemento	Congreso	Salta	Galindez et al., 2009
17	Ensayos de BTC una respuesta a demandas de comunidades aborígenes	Congreso	Santa Fe	Pardo et al., 2009
18	Capacitación en construcción con tierra sumando voluntades interinstitucionales	Congreso	Santa Fe	Mingolla et al., 2011
19	Vivienda con tecnología de tierra en argentina: autogestión, gestión estatal, gestión privada	Congreso	Buenos Aires	Rotondaro et al., 2011
20	Tecnologías participativas con tierra estabilizada en sectores urbanos pobres. Buenos Aires-Mar del Plata, Argentina	Congreso	Buenos Aires	Rotondaro et al., 2012
21	Vivienda sustentable para un área rural de la provincia de Tucumán	Congreso	Tucumán	Mas et al., 2016
22	Tecnología social y construcción con tierra para microemprendimientos barriales en Argentina	Congreso	Buenos Aires	Rotondaro y Cacopardo, 2016
23	Escuela Bioclimática - Sustentable Secundaria N° 39 - Villa de Antofagasta de la Sierra - Catamarca	Congreso	Catamarca	Walter et al., 2016
24	Tecnologías sociales y construcción con tierra en barrios de Mar del Plata, Argentina	Congreso	Buenos Aires	Cacopardo et al., 2017

Ing. Santiago Cabrera

25	Aportes para correlacionar resistencia a compresión y a erosión húmeda en bloques de tierra comprimida (BTC)	Congreso	Santa Fe	González et al., 2017
26	Prensa electromecánica para BTC	Congreso	Santa Fe	González y Cabrera, 2017
27	Métodos de evaluación del nivel de resistencia a la erosión húmeda en bloques de tierra	Congreso	Santa Fe	González et al., 2018
28	Análisis de una unidad productiva para la fabricación industrializada de bloques de tierra comprimida	Congreso	Santa Fe	Benvenuto et al., 2019
29	Bloques de Tierra Comprimida estabilizados con cal. Evaluación de dosificaciones y resistencia a la compresión	Congreso	Santa Fe/Buenos Aires	Cabrera et al., 2019
30	Problemáticas asociadas al desarrollo de la tecnología de construcción con BTC en Argentina	Congreso	Santa Fe/Tucumán	Dorado et al., 2019
31	Evaluación de viviendas construidas con BTC luego de 15 años de uso en Monteros, Argentina	Congreso	Tucumán	Lazo et al., 2019
32	El suelo-cemento, un recurso tecnológico para la construcción de edificios	Artículo	Tucumán	Alderete et al., 2006
33	Vivienda unifamiliar en BSC en la provincia de Tucumán	Artículo	Tucumán	Ortega Arguibay, 2007
34	Sustentabilidad de microemprendimientos productivos	Artículo	Santa Fe	González et al., 2007
35	Transferencia tecnológica en el hábitat popular de Argentina	Artículo	Buenos Aires	Rotondaro, 2007
36	Ensayos de resistencia a la compresión de bloques de suelo cemento	Artículo	Tucumán	Mas y Kirchbaum, 2011
37	Auditorias térmicas en viviendas construidas con tierra	Artículo	Buenos Aires	Patrone y Evans, 2012
38	Alianzas estratégicas entre universidad, estado y sociedad	Artículo	Santa Fe	González y Lazzarini, 2014
39	Tecnologías sociales en territorios urbanos pobres. Barrio Nuevo Golf, Mar del Plata, Argentina (2010-2018)	Artículo	Buenos Aires	Cacopardo et al., 2018
40	Bloques de tierra comprimida y tapia: dos técnicas con capacidad portante	Artículo	Buenos Aires/Córdoba	Rotondaro y Mandrini, 2018
41	Energía solar y diseño bioclimático en la construcción con tierra. Tres programas FONAVI de vivienda social en la provincia de Salta	Artículo	Salta	Lema, 2019
42	Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra	Artículo	Buenos Aires	Cuitiño et al., 2020
43	Investigación y desarrollo para el mejoramiento en la producción de BTC: 1° Congreso Nacional de Btceros	Artículo	Santa Fe	González et al., 2020
44	Evaluación higrotérmica y estructural de salón comunitario construido participativamente con BTC en zona semidesértica	Artículo	San Juan	Lucas et al., 2020
45	Producción de bloques eco modulares suelo cemento en Argentina. Estudio de Pre-factibilidad	Tesis	Mendoza	Butynski et al., 2017
46	Investigación sobre el uso de Bloques de Tierra Compactada (BTC). Su aplicación en el Centro Comunitario "Casas Viejas"	Tesis	Tucumán	Barroso, 2019
47	Resistencia a compresión en Bloques de Tierra Comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo	Artículo	Santa Fe/Buenos Aires	Cabrera et al., 2020
48	Bloques de tierra comprimida (btc) estabilizados con cal y cemento.	Artículo	Santa Fe/Buenos Aires	Cabrera et al., 2020

	Evaluación de su impacto ambiental y su resistencia a compresión			
49	Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina	Artículo	Santa Fe/ Tucumán	Dorado et al., 2021

II.5.b El sector productivo

Desde mediados del año 2019 y hasta la actualidad, miembros del Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN FRSF en colaboración con la Red PROTIERRA Argentina viene realizando un relevamiento de los productores de bloques de tierra comprimida (BTC), fábricas de prensas, constructores, laboratorios de ensayos, obras construidas, profesionales que proyecten y construyan con estos mampuestos, y todo tipo de emprendimiento vinculado a la tecnología del BTC en Argentina. Con esta información se desarrolló un mapa virtual interactivo, al cual puede accederse a través del siguiente enlace: <http://redprotierra.com.ar/2020/10/20/btc-en-argentina-bloque-de-tierra-comprimida/> [128].

Los puntos en el mapa fueron asignados en 5 capas que pueden activarse o desactivarse en función del tipo de la información requerida: Fabricantes de equipos, Productores, Constructores, Venta de equipos, Laboratorios y Obras Construidas. Además, pueden filtrarse los emprendimientos en función de su nivel de actividad, “desactivándose” los emprendimientos actualmente inactivos. Es importante mencionar que, todos los actores vinculados a la producción de BTC en Argentina, también fueron incluidos en la categoría “constructores” ya que hasta el momento no se detectó ningún emprendimiento abocado únicamente a la fabricación y venta de estos bloques.

Actualmente en el mapa puede encontrarse la información de contacto e imágenes de 66 puntos distribuidos por todo el territorio nacional, correspondiendo 28 de estos puntos a “Productores y Constructores”, 6 a laboratorios e instituciones de investigación y asesoramiento y 5 emprendimientos abocados a la fabricación y venta de equipos para la producción de BTC. Evaluando la distribución por provincia de los actores incluidos en el mapa puede apreciarse cómo en las provincias de Córdoba y Santa Fe, Buenos Aires y Tucumán se encuentra la mayor densidad de agentes vinculados a esta tecnología (72%); contando todas ellas con fabricantes de bloques, constructores, fabricantes de equipos e institutos de investigación.

Finalmente, en las Figura 12 y Figura 13 pueden apreciarse los diferentes actores relevados e incorporados al mapa con sus correspondientes categorías de inclusión, como así también la información asignada a cada uno de ellos; además de diversas obras construidas con BTC incluidas en el mapa, el cual se encuentra en permanente actualización.

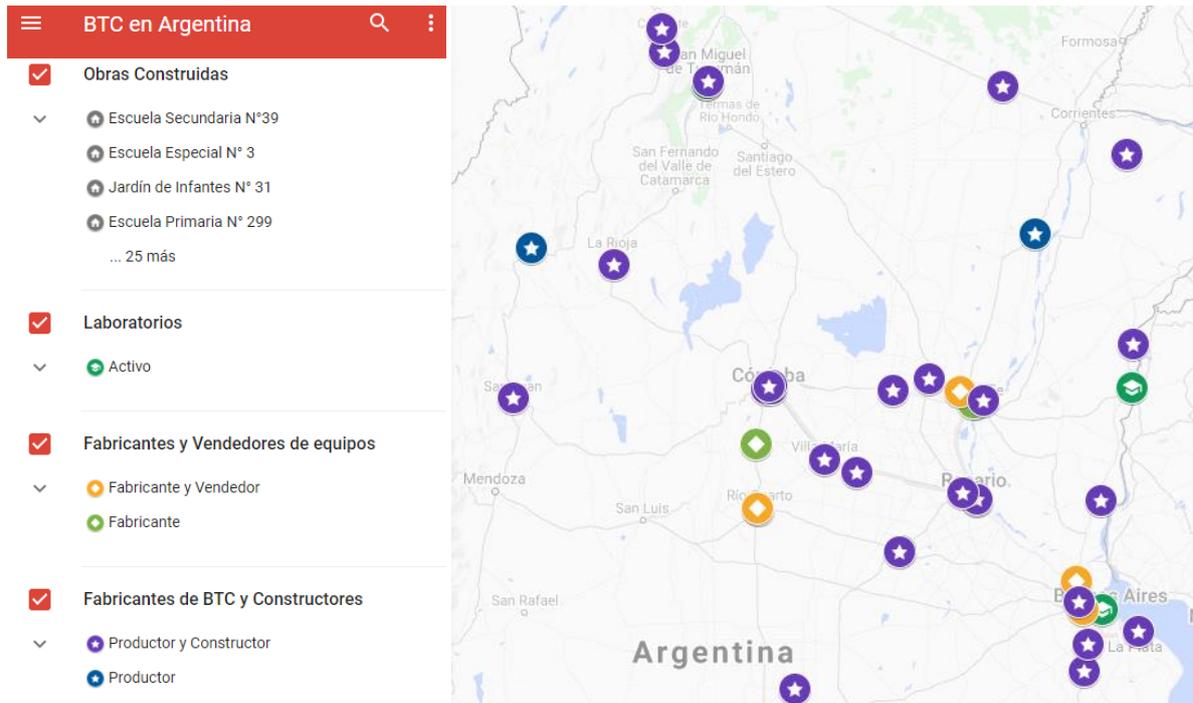


Figura 12: Categorías y puntos incluidos en el Mapa de BTCeros Argentina.

Fuente: Cabrera et al [129].

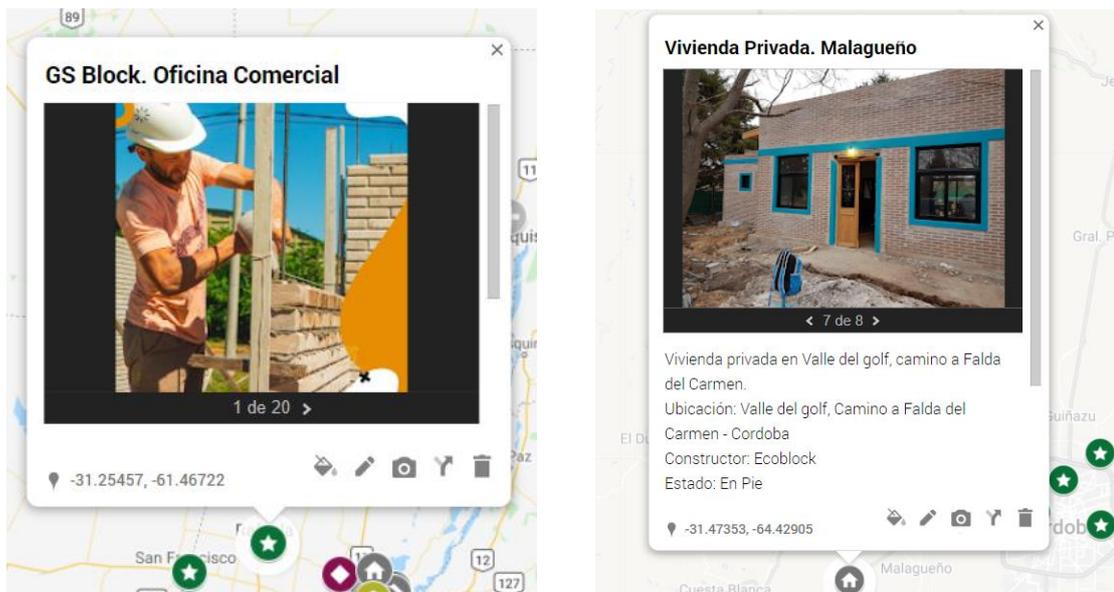


Figura 13: Galería de fotos e información incluida en cada punto del mapa de BTCeros.

Fuente: Cabrera et al. [129].

II.5.b.i Intereses y motivación

Al indagar sobre las motivaciones de los diversos actores relacionadas a la tecnología del BTC, Dorado *et al.* [125] determinaron que una parte significativa del interés se encuentra vinculado a temas de investigación y desarrollo, y corresponde en gran medida con los agentes vinculados a centros de investigación. Entre los principales tópicos se indica el interés en el desarrollo y transferencia tecnológica de un sistema constructivo innovador que posibilite resolver necesidades de vivienda para grupos sociales vulnerables, que pueda ser normalizado y, al mismo tiempo, que permita fácilmente la fabricación *in situ* sin comprometer la calidad de los bloques.

Aquellos agentes cuyo interés ha sido emplear un sistema constructivo con perfil ecológico - considerando la posibilidad de reducción de la huella de carbono en la fabricación de bloques, así como la reducción del gasto energético por mejor desempeño térmico-, disponible en el mercado y favorable a la autoconstrucción recoge el 30% del interés manifestado. Asimismo, los agentes involucrados en la fabricación y comercialización de BTC, enuncian la implementación de esta tecnología como una estrategia comercial, un nicho de oportunidad en la venta de elementos constructivos por considerarse un sistema constructivo ecológico [125].

Cuando los agentes mencionan que su vinculación con el BTC ha derivado de su actividad laboral (18%), su interés se centra en gestionar la reglamentación del sistema constructivo, aspecto que lo vinculan con la estandarización de la calidad de los productos (el bloque y la construcción) y mejorar la capacitación de personal técnico para la fabricación y mano de obra para la construcción [125].

Finalmente, el interés de los agentes de organismos estatales o profesionales que han articulado en proyectos estatales es implementar sistemas constructivos que permitan resolver problema de acceso a la vivienda, primando la búsqueda de alternativas de materiales económicos y ecológicos, adaptados al sitio de implementación y favorable para el desarrollo de emprendimientos sociales de producción de materiales [125].

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

III.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES

Para la realización de esta investigación se consultaron fuentes bibliográficas de centros de investigación, redes y laboratorios de ensayos normalizados, ordenándose toda la información recopilada sobre los diferentes protocolos de ensayo para caracterizar la materia prima empleada en la elaboración de BTC y evaluar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Las normas específicas consultadas son de Argentina, Brasil, Colombia, España, Francia, India, Estados Unidos, México y Nueva Zelanda. Además, se estudiaron los resultados de investigaciones similares publicados en revistas indexadas, tesis de grado y posgrado y otra información de interés para la investigación.

La materia prima empleada en la investigación fue seleccionada de manera tal que sea representativa de los materiales disponibles en la ciudad de Santa Fe, es decir, directamente extraída o producida en las proximidades de la ciudad, o de gran disponibilidad comercial en ella.

Los ensayos de caracterización física de los materiales empleados en la elaboración de las muestras de estudio se realizaron en los laboratorios de la UTN FRSF, al igual que los ensayos físico-mecánicos realizados sobre las probetas. La caracterización química de los materiales y la evaluación de los productos de hidratación de las reacciones puzolánicas en las muestras estabilizadas con cal y adiciones minerales se realizaron durante una estancia de investigación del tesista en los laboratorios del Departamento de Petrología y Mineralogía de la Universidad de Granada UGR (España). La evaluación del impacto ambiental de los bloques estabilizados con cemento Portland, cal y adiciones minerales se realizó en la Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma de Tamaulipas FADU UAT, en Tampico (México), donde, el tesista realizó una estancia de investigación.

Para estudiar los efectos de la estabilización con cal y adiciones minerales en las propiedades de los BTC se produjeron en una primera instancia, en el Laboratorio de Geotecnia de la UTN FRSF 100 BTC estabilizados con diferentes proporciones de cal y cemento, empleando además distintas relaciones tierra/arena, sobre los cuales se evaluó únicamente la resistencia a compresión seca. En una segunda instancia, con intenciones de evaluar el efecto del reemplazo parcial de cal por adiciones minerales en las propiedades de los BTC se moldearon en el Laboratorio de Materiales de la UTN FRSF 8 series de probetas cilíndricas (96 en total) con diferentes dosificaciones. Finalmente, para estudiar el efecto del “cambio de escala” en la

producción de los BTC e incidencia en las propiedades de los bloques estabilizados con cal y adiciones minerales, se fabricaron 120 BTC replicando las mismas 8 dosificaciones empleadas para la fabricación en laboratorio de las probetas cilíndricas. Estos BTC fueron fabricados en la planta de producción de la empresa Eco3 Ingeniería, en la ciudad de Esperanza, Santa Fe.

Sobre las probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica se determinó la densidad seca y se realizaron ensayos de resistencia a compresión seca, absorción de agua por inmersión, resistencia a compresión saturada, absorción de agua por capilaridad y resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión.

Con intenciones de evaluar el impacto ambiental de los BTC estabilizados con diferentes contenidos de cal y cemento Portland y distintos porcentajes de reemplazo de cal por adiciones minerales se empleó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) propuesta por la norma IRAM-ISO 14040:2017 [130], la cual permite caracterizar y cuantificar los diversos impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas de la vida útil de un producto o sistema. Para realizar este análisis se empleó el software SimaPro9 [131].

Finalmente, los resultados de los ensayos realizados fueron registrados en planillas y procesados en softwares específicos, elaborándose tablas y gráficos donde se compararon los resultados obtenidos según las dosificaciones empleadas, lo cual posibilitó su análisis detallado.

III.2 OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES

La tierra empleada en la fabricación de los BTC provino de una cantera emplazada en la comuna de Monte Vera, provincia de Santa Fe, destinada a la extracción de suelo para obras viales. La arena utilizada para la corrección granulométrica de la tierra fue adquirida en una arenera de la ciudad de Santa Fe, la cual la obtiene por dragado en la margen oeste del Río Paraná. En la Figura 14 se pueden apreciar los puntos de extracción de la tierra y arena empleadas durante el desarrollo de esta tesis.

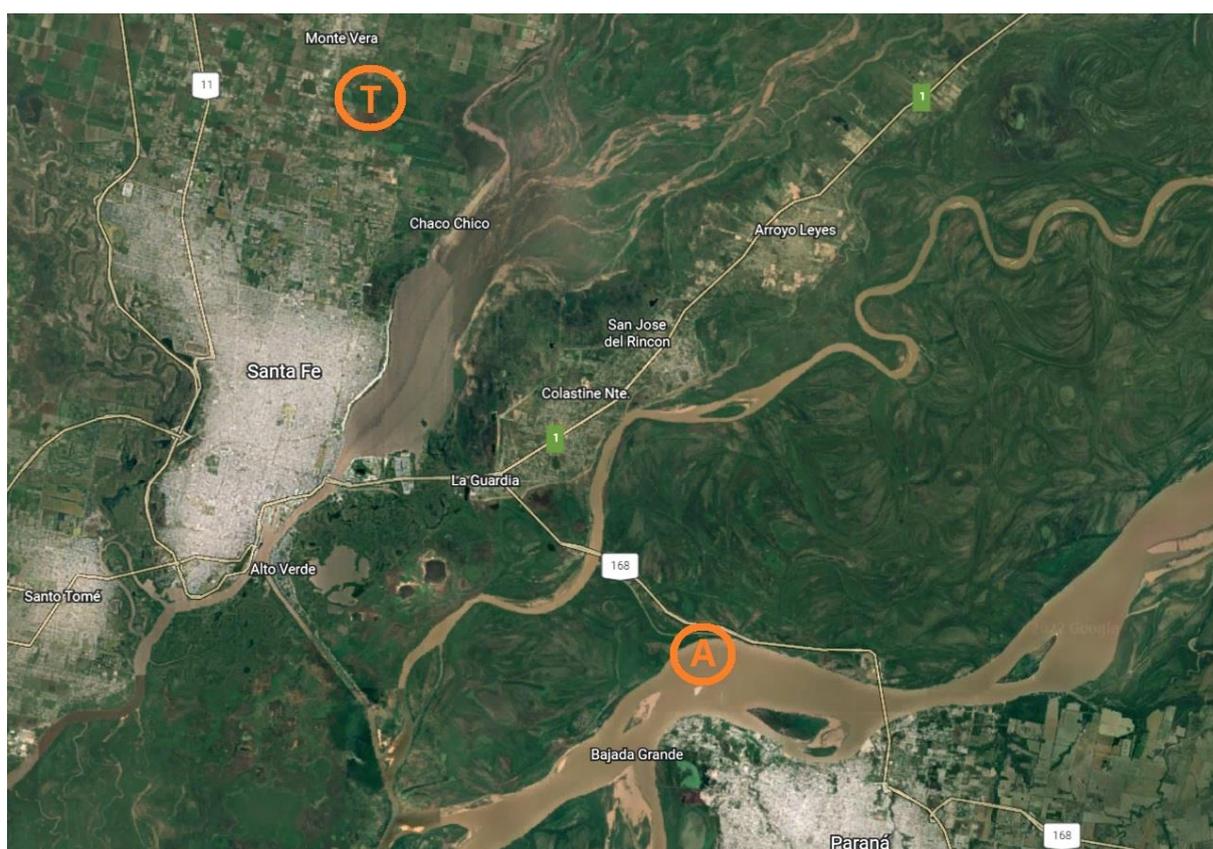


Figura 14: Puntos de extracción de tierra (T) y arena (A) en las proximidades de la ciudad de Santa Fe, Argentina. **Fuente:** Elaboración propia sobre imagen de Google Earth [132].

El polvo de ladrillo empleado se adquirió en un corralón de la ciudad de Santa Fe, quienes lo fabrican triturando ladrillos de descartes (rotos o con un grado de cocción inadecuado para su comercialización) proporcionados por diversas ladrilleras próximas a la ciudad. La puzolana utilizada es extraída y comercializada por la empresa “Minera del Sur” cuyas canteras se encuentran a las afueras del poblado Paraditas, junto a la cordillera de Los Andes en la provincia de Mendoza. A pesar de la distancia, este material es de fácil adquisición en la ciudad de Santa Fe por un acuerdo comercial entre la empresa que explota la cantera y diversos corralones de la provincia, los cuales la comercializan como “agregado liviano” para hormigones y morteros.

Para la estabilización de las diferentes series de BTC se empleó cemento Portland tipo CPC 40 [133] producido por la empresa “Holcim” y cal aérea hidratada marca “Andina”, fabricada por la empresa “Cal FGH” en la provincia de San Juan y “Blancaley”, producida por la empresa homónima en la provincia de Córdoba.

En las Figura 15 y Figura 16 se exponen todos los materiales empelados durante el desarrollo de esta tesis.

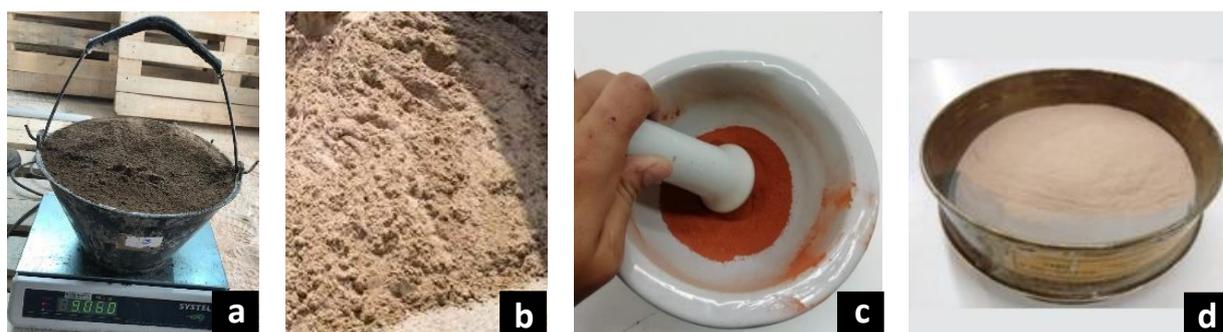


Figura 15: a) Tierra, b) arena, c) polvo de ladrillo y d) puzolana empleados en la investigación.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 16: Estabilizantes empleados en la fabricación de los BTC. a) Cal aérea hidratada Andina b) Cal aérea hidratada Blancaley y c) Cemento Portland CPC40 Holcim. Fuente: Elaboración propia.

III.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS MATERIALES

III.3.a Análisis granulométrico

Para determinar la distribución granulométrica de la materia prima (tierra, arena, puzolana y polvo de ladrillo) se llevó a cabo el análisis mecánico de materiales granulares estipulado por la Norma IRAM 10512:1977 [134] empleando la serie de tamices indicada en la Figura 17. Además, para evaluar la distribución porcentual de partículas finas presentes en la materia prima (tamaño inferior a $75 \mu\text{m}$) se realizó el tamizado por vía húmeda estipulado por la norma IRAM 10507:1986 [135], cuya realización puede apreciarse en la Figura 18.



Figura 17: Serie de tamices empleada para el análisis granulométrico. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 18: Ensayo de tamizado por vía húmeda sobre una muestra de tierra. **a)** Desterronado de los conglomerados de arcilla, **b)** pesado de la muestra, **c)** realización del tamizado húmedo sobre la malla #200 y **d)** fracción retenida sobre el tamiz (seca) luego de la realización de ensayo. **Fuente:** Elaboración propia.

Finalmente, se construyó la curva granulométrica de cada material representando el tamaño de partícula (en mm) -en escala logarítmica- en el eje de las abscisas y el porcentaje pasante -en escala natural- en el eje de las ordenadas.

III.3.b Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente de la materia prima se realizó una variante del ensayo propuesto por la norma IRAM 1520:2002 [136]: se colocaron 250 ml de material seco dentro de una probeta graduada de vidrio previamente tarada y se pesó, determinando así la masa de los 250 ml (Figura 19). Finalmente, con la masa y el volumen aparente del material, se calculó su densidad aparente empleando la ec. 4:

$$d = \frac{m}{V} \quad (ec. 4)$$

Siendo:

- d = Densidad aparente
- m = Masa
- V = Volumen aparente (en este caso, 250 ml)



Figura 19: Determinación de la densidad aparente de la tierra. En la balanza puede apreciarse la masa conjunta de la probeta y la tierra. **Fuente.** Elaboración propia.

III.3.c Caracterización de la tierra

III.3.c.i Sedimentación

Para conocer la distribución de tamaños de la fracción fina de la tierra (partículas menores a 75 μm) se realizó el ensayo de sedimentación estipulado por la norma ASTM D422:1990 [137], midiendo la velocidad de decantación de las partículas dispersas en agua en función de la variación de la densidad de la solución, empleando para la medición un hidrómetro normalizado. Este ensayo se basa en la ley de Stoke, según la cual "la velocidad de caída de las partículas de igual densidad en un mismo líquido aumenta con el cuadrado de su radio" [138].

Para la realización de este ensayo se preparó 1 l de suspensión coloidal con 50 g de tierra seca y agua destilada, incorporando 2.5 ml de hexametáfosfato de sodio al 40% m/v como agente dispersante. En la Figura 20 se muestran los materiales, equipos y procedimientos empleados para la realización de este ensayo.

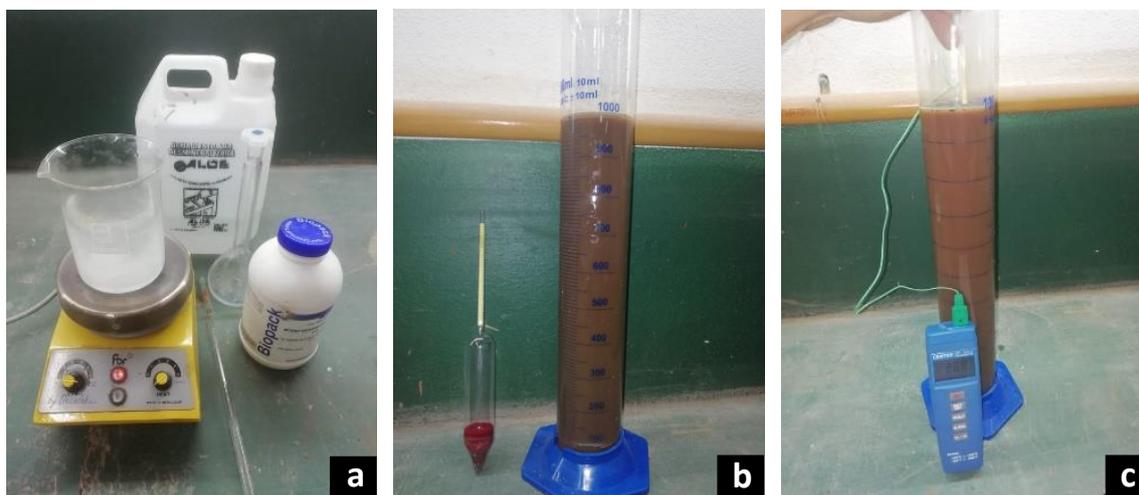


Figura 20: Realización del ensayo de sedimentación. **a)** Preparación del agente dispersante: hexametáfosfato de sodio, **b)** hidrómetro H 151 empleado para determinar la variación de la densidad a lo largo del tiempo y **c)** medición de la temperatura de la suspensión coloidal. **Fuente:** Elaboración propia.

En el caso de la tierra, la curva de distribución granulométrica se construyó combinando los resultados del ensayo de sedimentación con los obtenidos por tamizado, determinando así el porcentaje de arena gruesa, arena fina, limo y arcilla.

III.3.c.ii Límites de Átterberg

Para conocer la plasticidad de la tierra se determinó sobre la fracción pasante por el tamiz #40 (apertura de 0.43 mm) el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, siguiendo para ello los procedimientos establecidos por la norma IRAM 10501:2007 [139].

III.3.c.iii Contracción lineal

Con el remanente de la tierra empleada para la determinación del límite líquido y conservando dicha humedad (correspondiente a 25 golpes) se moldeó una probeta prismática (10 x 2 x 2 cm) de lado y se la llevó a estufa a 70 °C hasta evaporar el agua contenida, lo cual se evidenció al mantenerse constante el peso luego de 2 pesadas consecutivas. Midiendo la longitud de la probeta seca se determinó la contracción lineal del suelo, expresada como porcentaje de la

longitud inicial (húmeda). Esta técnica operatoria es una variante del método establecido en la norma IRAM 10504:1976 para evaluar la contracción volumétrica del suelo [140].

III.3.c.iv Contenido de materia orgánica

Para la determinación del contenido de materia orgánica de la tierra se empleó el método de calcinación seca [141]. Para ello se pesó 1 g de tierra en crisoles de porcelana de peso conocido; luego fueron colocados en una estufa a 105°C durante 12 hs, enfriados en desecador y pesados. Finalmente, se colocaron los crisoles en una mufla a 600 °C por 60 minutos, se enfriaron en desecador y volvieron a pesarse, determinándose el contenido de materia orgánica por diferencia de peso, empleando la Ecuación 5.

$$MO = \left(\frac{P_{105} - P_{600}}{P_{105} - P_{crisol}} \right) * 100 \quad (ec. 5)$$

Siendo:

- MO = Contenido de materia orgánica, en %
- P_{105} = Peso del suelo seco, incluyendo el peso del crisol, en g
- P_{600} = Peso del suelo calcinado, incluyendo el peso del crisol, en g
- P_{crisol} = Peso del crisol, en g

Finalmente, en la Figura 21 se muestra el procedimiento realizado para la determinación del contenido de materia orgánica por calcinación de la tierra.



Figura 21: Determinación del contenido de materia orgánica por calcinación. **a)** Extracción de las muestras de la mufla y **b)** muestra de tierra antes y después de ser calcinada. **Fuente:** Elaboración propia.

III.3.c.v Contenido de sales solubles

Para determinar el contenido de sales solubles totales en la tierra empleada se realizó el ensayo propuesto por la norma VN-E18:1989 [142] mediante el cual, aprovechando el efecto floculador de las sales sobre el suelo en suspensión, puede determinarse simplemente por inspección visual si el contenido de sales en el suelo es bajo o nulo. Para ello se prepara una dilución con 100 g de suelo seco y 500 ml de agua destilada con la ayuda de un agitador magnético y se deja reposar por 24 hs. Si luego de este período el agua permanece turbia con partículas de suelo en suspensión, se infiere que este no se encuentra floculado, estableciéndose en consecuencia que el contenido de sales solubles es inferior al 0.1 %. En la Figura 22 puede apreciarse el procedimiento realizado para la determinación del contenido de sales solubles en la tierra.



Figura 22: Determinación del contenido de sales solubles totales en muestras de tierra.

Fuente: Elaboración propia.

III.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES

III.4.a Ensayos analíticos

Para la caracterización química y mineralógica de la materia prima y la identificación y análisis de las fases hidratadas formadas durante las reacciones puzolánicas se emplearon diferentes técnicas instrumentales tales como: fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), espectrometría de dispersión de rayos X (EDX) y absorción de $N_2(g)$. Todas estas técnicas se llevaron a cabo en los laboratorios del Departamento de Mineralogía y Petrología y el Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada (UGR), España.

III.4.a.i Fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X (FRX) consiste en la emisión de rayos X secundarios (o fluorescentes) característicos de un material que ha sido excitado al “bombardearse” con rayos X de alta energía o rayos gamma. Estudiando la radiación fluorescente emitida por el material, puede determinarse directamente la cantidad de cada elemento químico presente en el material de la muestra [143].

En esta tesis, la composición química de los materiales utilizados se determinó empleando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil, con un tubo de rayos X de 50 kV y 100 μ A Niton XL3t (Thermo Scientific, USA), el cual se expone en la Figura 23.



Figura 23: Espectrómetro de fluorescencia de rayos X empleado.
Fuente: Catalogo comercial de Thermo Scientific [144].

III.4.a.ii Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es un método que permite identificar minerales por su estructura cristalina. Esto es posible porque la distribución regular en el espacio de los componentes de un mineral se describe por medio de las redes cristalinas, que manifiestan la repetición periódica de una celda mineral, unidad en forma de paralelepípedo que, repetida idénticamente, llena todo el espacio del cristal; la descripción de la celda proporciona toda la información sobre la estructura cristalina del mineral. De esta manera, la difracción de rayos X permite distinguir minerales a partir de sus redes cristalinas [145].

Las características mineralógicas de los materiales empleados y la formación de nuevas fases minerales luego de los diferentes métodos de estabilización fueron estudiadas con el difractómetro de rayos X del Departamento de Mineralogía y Petrología de la UGR (Figura 24)

utilizando muestras de polvo desorientado (Figura 25) y, con intenciones de identificar los filosilicatos presentes en las muestras de tierra, agregados orientados de la fracción arcilla secados al aire, expandidas con etilenglicol y calcinadas a 550°C (Figura 26).

Las características del equipo empleado fueron las siguientes:

- Difractómetro: Panalytical X'Pert Pro (The Netherlands)
- Fuente de rayos X: Radiación CuK, 45 kV, 40 mA
- Rango de exploración 2θ : 3 – 60°, con toma de datos cada 0.008° (step size)
- Tiempo de acumulación por punto: 10 seg.



Figura 24: Difractómetro de rayos X del Departamento de Mineralogía y Petrología de la UGR.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 25: Preparación de muestras de polvo desorientado para DRX.

Fuente: Elaboración propia.

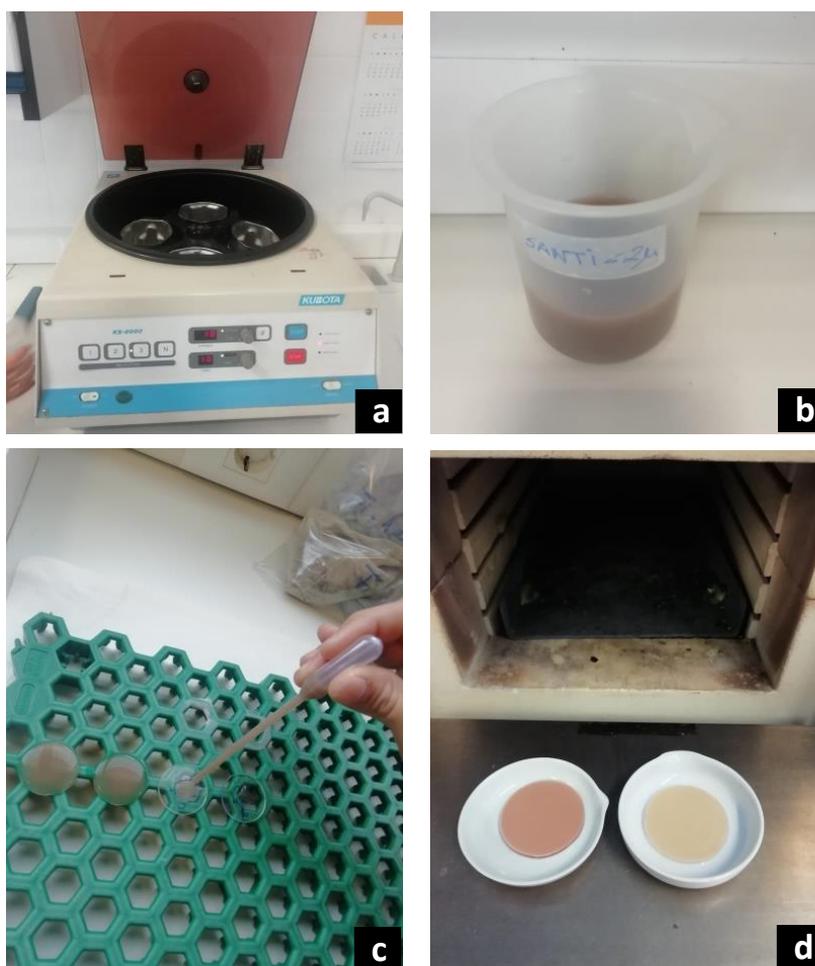


Figura 26: Preparación de muestras de agregados orientados de la fracción arcilla de la tierra. **a)** Ultracentrífuga empleada para la separación de la fracción arcilla, **b)** fracción arcilla en suspensión acuosa, **c)** preparación de muestras para DRX y **d)** Calcinación a 550° de una muestra. **Fuente:** Elaboración propia.

III.4.a.iii Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)

Para determinar los cambios en la morfología y microestructura de las muestras tras los diferentes métodos de estabilización se empleó un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (AURIGA, Carl Zeiss SMT) equipado con un emisor de energía de rayos X EDS (INCA-200, Oxford), el cual permitió evaluar de manera cualitativa la composición química de las muestras. Dado que las muestras no son conductoras, debieron recubrirse con carbono antes de ser analizadas. En la Figura 27 se expone el microscopio electrónico empleado y en la Figura 28 las muestras recubiertas de carbono para ser analizadas por FESEM.



Figura 27: Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo del Centro de Instrumentación Científica (CIC) de la UGR. **Fuente.** Elaboración propia.

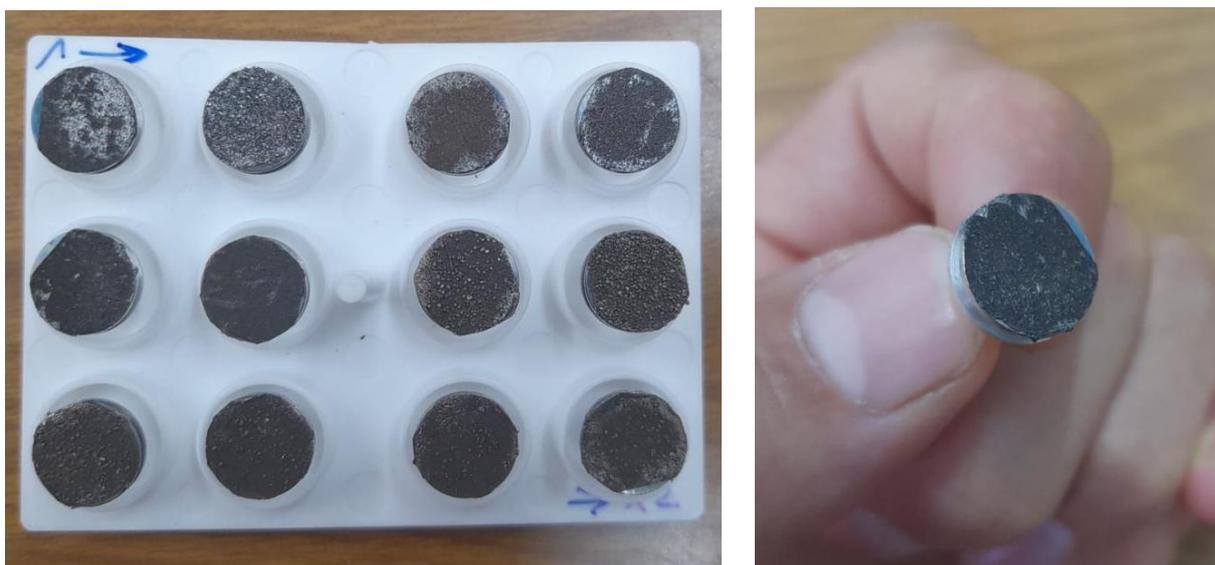


Figura 28: Muestras recubiertas con carbono para ser analizadas por el FESEM. **Fuente:** Elaboración propia.

III.4.a.iv Superficie específica

La determinación de la superficie específica de los materiales utilizados –por adsorción de $N_2(g)$, aplicando el método de BET [146]- se realizó empleando un TriStar 3000 analyzer (Micrometrics). Previo al análisis, las muestras fueron desgasificadas a $120^\circ C$ durante 24 hs empleando un sistema de desgasificación de muestras VacPrep 061 (Micrometrics). En la Figura 29 se muestra

el equipo empleado para la desgasificación de las muestras y la determinación de la superficie específica de los materiales.



Figura 29: Equipamiento empleado en la determinación de la superficie específica de la materia prima. **Fuente:** Elaboración propia.

III.4.b Cal útil vial

El contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 e impurezas de las cales comercialmente disponibles en la ciudad de Santa Fe se determinó en el Laboratorio Romeo Miretti de la UTN FRSF mediante titulación con ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, adoptando el protocolo estipulado por la Dirección Nacional de Vialidad [147] para tal fin. Además, los contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaCO_3 se corroboraron mediante la semicuantificación de minerales con DRX; tarea realizada en el Depto. de Mineralogía y Petrología de la UGR. En la Figura 30 se aprecian las muestras de cal ensayadas, el proceso de titulación y las impurezas remanentes de la cal Blancaley luego de la realización del ensayo.

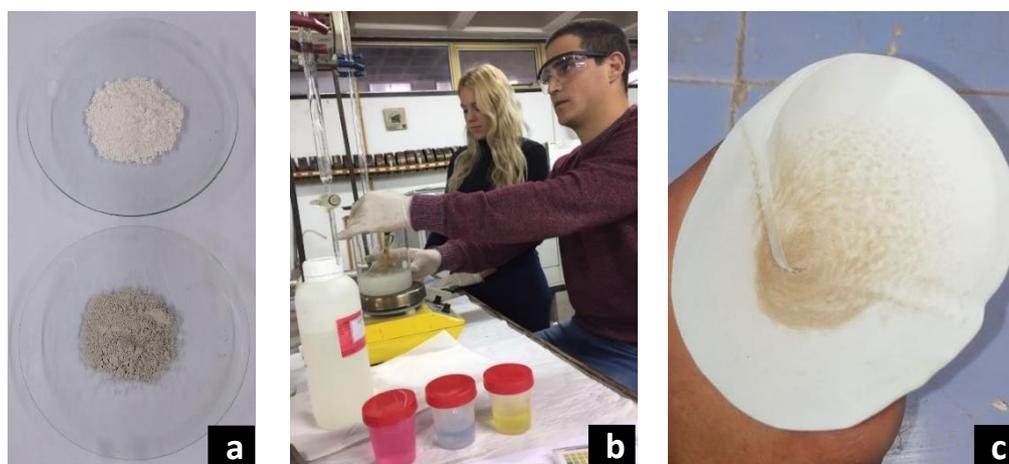


Figura 30: **a)** Muestras de cal Andina (arriba) y Blancaley (abajo). **b)** Determinación del contenido de CaCO_3 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por titulación con HCl e NaOH y **c)** impurezas de la cal marca Blancaley. **Fuente:** Elaboración propia.

III.4.c Determinación de la capacidad puzolánica de las adiciones

III.4.c.i Método Químico

La capacidad puzolánica del polvo de ladrillo y la puzolana se evaluó mediante el método “saturated lime test”, el cual determina el potencial puzolánico empleando como indicador el consumo de Ca^{2+} de una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de adición mineral [148].

Para esta evaluación se agregaron 4 g de material puzolánico dentro de un recipiente plástico que contiene 300 ml de una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reemplazando el aire contenido dentro de los recipientes por N_2 (para evitar el proceso de carbonatación) y sellándolos, tras lo cual se las almacenó en estufa a 40°C [22]. Finalmente, se determinó el contenido de Ca^{2+} a 1, 5, 8 y 15 días mediante la utilización de autovalorador potenciométrico (methrom titrando 905). Además de las muestras con polvo de ladrillo y puzolanas naturales se ensayaron muestras de metacaolín –de elevada capacidad puzolánica [149]- para tomar como referencia y de la tierra empleada en la fabricación de los BTC. El metacaolín empleado fue provisto por la empresa alemana “Poraver”.

Finalmente, en la Figura 31 puede apreciarse el proceso empleado para la determinación de la capacidad puzolánica de las adiciones minerales.



Figura 31: Determinación de la capacidad puzolánica de las adiciones minerales.

Fuente: Elaboración propia.

III.4.c.ii Método mecánico

Además del consumo del ion Ca^{2+} , para evaluar la capacidad puzolánica de las distintas adiciones minerales se evaluó la resistencia a compresión a 28 días de probetas cúbicas de morteros de cal con diferentes porcentajes de polvo de ladrillo o puzolana, ambos molidos hasta pasar por el tamiz #200 (75 μ m).

La presencia de adiciones en los morteros de cal, dependiendo del tipo, cantidad y finura con que se incorporan modifica el consumo de agua requerido para alcanzar la consistencia normal de ensayo (fluidez comprendida entre 60 y 75%). Por este motivo, fue necesario determinar previamente el contenido de agua requerido para cada porcentaje de reemplazo empleando la mesa de escurrimiento. En la Tabla 7 se puede apreciar las dosificaciones empleadas para cada serie de morteros.

Tabla 7: Dosificaciones empleadas para moldear las diferentes series de morteros de cal y adiciones minerales. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie	Arena (g)	Cal (g)	P. Ladrillo (g)	Puzolana (g)	Agua (g)	Fluidez (%)
Cal	1500	500	-	-	395	16.8
L 10	1500	450	50	-	400	17.3
L 30	1500	350	150	-	345	16.0
L 50	1500	250	250	-	303	-
P 10	1500	450	-	50	390	16.0
P 30	1500	350	-	150	365	16.0
P 50	1500	250	-	250	371	13.0

Una vez establecida la cantidad de agua necesaria para cada dosificación, se moldearon 4 probetas cúbicas de 7 cm de lado, curadas dentro de sus moldes en cámara húmeda a 90% de humedad y 25 °C por 7 días, luego de los cuales se desmoldaron y mantuvieron en cámara húmeda por 21 días más. Finalmente, a los 28 días de edad, como puede apreciarse en la Figura 32, se determinó la resistencia a compresión de cada probeta siguiendo los requisitos de la norma IRAM 1695:1984 [150].



Figura 32: Realización del ensayo de resistencia a compresión sobre una probeta de la serie P-30.
Fuente: Elaboración propia.

III.5 CONFECCIÓN DE PROBETAS

III.5.a BTC producidos en laboratorio

En una primera instancia, con intenciones de poner a punto los equipos de ensayo y determinar las resistencias a compresión de los BTC estabilizados únicamente con cal y cemento (patrones de comparación) y ajustar la relación tierra/arena del mortero base, se fabricaron en el laboratorio de Geotecnia de la UTN FRSF 20 series de 5 BTC cada una, cuyas dosificaciones se presentan en la Tabla 8.

Se produjeron bloques de 25.0 x 12.5 x 6.25 cm con dos perforaciones verticales de 6.0 cm de diámetro cada una, empleando una prensa hidráulica Eco Brava desarrollada por la compañía brasilera “Eco Máquinas” (Navegantes, Brasil). Todas las series fueron confeccionadas con una humedad comprendida entre el 11.5 y 13.0%, considerando el peso seco del resto de los materiales. Los estabilizantes empleados fueron cal aérea hidratada marca “Andina” (la determinación del contenido de Ca(OH)_2 de las diferentes cales comerciales indicó que ésta es la de mayor pureza) y cemento Portland compuesto CPC 40 marca “Holcim”. En la Figura 33 se muestra el procedimiento adoptado para la fabricación de los BTC.

Tabla 8: Dosificación en peso de las diferentes series de BTC fabricadas en el laboratorio de geotecnia de la UTN FRSF. **Fuente:** Elaboración propia.

	Serie	Tierra (%)	Arena (%)	Cemento (%)	Cal (%)
1	Tierra - A0%	100	0.0	-	-
2	Tierra - A15%	85.0	15.0	-	-
3	Tierra - A30%	70.0	30.0	-	-
4	Tierra - A50%	50.0	50.0	-	-
5	Cto - A0%	90.0	0.0	10.0	-
6	Cto - A15%	76.5	13.5	10.0	-
7	Cto - A30%	63.0	27.0	10.0	-
8	Cto - A50%	45.0	45.0	10.0	-
9	Cal - A0%	90.0	-	-	10.0
10	Cal - A15%	76.5	13.5	-	10.0
11	Cal - A30%	63	27.0	-	10.0
12	Cal - A50%	45	45.0	-	10.0
13	Cto 2,5%	48.75	48.75	2.5	-
14	Cto 5%	47.5	47.5	5.0	-
15	Cto 15%	42.5	42.5	15.0	-
16	Cto 20%	40.0	40.0	20.0	-
17	Cal 2,5%	68.25	29.25	-	2.5
18	Cal 5%	66.5	28.5	-	5.0
19	Cal 15%	59.5	25.5	-	15.0
20	Cal 20%	56.0	24.0	-	20.0



Figura 33: Proceso de fabricación de BTC en el laboratorio de geotecnia de la UTN FRSF. **a)** Tierra seca antes de ser molida. **b)** Proceso de molienda de la tierra. **c)** Dosificación por peso de la materia prima. **d)** Incorporación del agua por pulverizado dentro de la mezcladora, con ésta en funcionamiento. **e)** Llenado del molde de la prensa. **f)** BTC inmediatamente luego de ser prensado. **g)** Acopio de BTC para ser curados. **h)** Envoltura de los BTC húmedos con un film de polietileno para favorecer su curado. **Fuente:** Elaboración propia.

III.5.b Probetas cilíndricas

Para evaluar el efecto del reemplazo parcial de cal por adiciones minerales en las propiedades de los BTC se moldearon en el Laboratorio Romeo Miretti de la UTN FRSF 8 series de probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro y 7 cm de alto, cada una de ellas constituida por 12 ejemplares y una dosificación particular-la cual fue definida luego de evaluar la resistencia a compresión de

los BTC fabricados en laboratorio-; empleando una relación tierra/arena de 7/3 para todas las series salvo la estabilizada con cemento, cuya relación tierra/arena fue 1/1. El contenido de agua se mantuvo prácticamente constante en todas las series (13% del peso seco de la mezcla), al igual que la cantidad total de estabilizantes incorporados (10 % del peso seco). Para la preparación de las muestras con adiciones minerales, tanto el polvo de ladrillo como la puzolana se molieron manualmente hasta pasar por el tamiz #200 (75 μm), mientras que los terrones de tierra se desintegraron empleando la misma moledora mecanizada utilizada en la fabricación de los BTC de laboratorio (Figura 33.b).

Con el objetivo de generar probetas representativas se emplearon los siguientes parámetros de diseño, adoptados en función de las características de los BTC producidos con la prensa de accionamiento hidráulico ECO BRAVA empleada para la fabricación de los BTC producidos en laboratorio:

- Densidad seca: 1.600 kg/m³
- Tasa de compresión: 35%
- Humedad de la mezcla: 13%
- Tamaño del molde: 5 cm de diámetro x 11 cm de alto.

El procedimiento empleado para la confección de estas probetas fue el siguiente: el material requerido para cada serie se mezcló de manera manual, primero en seco y luego incorporando el agua requerida para alcanzar una humedad del 13%. A continuación, se colocó dentro del molde cilíndrico la cantidad requerida para alcanzar la densidad seca establecida (264.2 g de mezcla húmeda), acomodando el material dentro del molde con los dedos. Luego, con ayuda de un pistón hidráulico se comprimió el contenido del molde para llevarlo desde su altura inicial de 11 cm hasta una altura final de 7.10 cm (tasa de compresión del 35%). Finalmente, con la ayuda del mismo pistón se desmolda la probeta, se pesa y miden sus dimensiones. El curado de las series estabilizadas con cemento, cal y adiciones minerales (series III a VIII) se realizó humedeciéndolas con agua y manteniéndolas envueltas en un film de polietileno.

Finalmente, en la Tabla 9 se indican las dosificaciones en peso seco correspondiente a cada serie, mientras que en la Figura 34 se expone el procedimiento empleado para la conformación de las probetas.

Tabla 9: Dosificación en peso seco de los materiales de las diferentes series de probetas cilíndricas producidas en laboratorio. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie		Tierra (%)	Arena (%)	Cal (%)	Cemento (%)	Puzolana (%)	Polvo de ladrillo (%)
I	Tierra/arena 1	70	30	-	-	-	-
II	Tierra/arena 2	50	50				
III	Cemento. 10%	63	27	-	10	-	-
IV	Cal 10%	63	27	10	-	-	-
V	Puzolana 3%	63	27	7	-	3	-
VI	Puzolana 5%	63	27	5	-	5	-
VII	P. ladrillo 3%	63	27	7	-	-	3
VIII	P. ladrillo 5%	63	27	5	-	-	5



Figura 34: Probetas cilíndricas producidas en laboratorio. **Fuente:** Elaboración propia.

III.5.c BTC producidos en fábrica

En una tercera instancia, con intenciones de evaluar el efecto producido en sus propiedades por el cambio de escala, se fabricaron BTC en la planta de producción de la empresa Eco3 Ingeniería, abocada a la fabricación industrializada de BTC en la ciudad de Esperanza, Santa Fe.

Con el equipamiento propio de la empresa se produjeron 15 BTC por cada una de las 8 dosificaciones empleadas durante la confección de las probetas cilíndricas (Tabla 9). El proceso empleado en la fabricación de los BTC, el cual se presenta en la Figura 35, se describe a continuación: se incorporó la materia prima de cada serie dentro de una mezcladora mecánica de 300 l de capacidad donde se realizó una homogenización en seco mezclando por 2 minutos, luego de lo cual, con la mezcladora en funcionamiento, se incorporó el agua requerida para alcanzar una humedad del 13% mediante pulverización, evitando así la formación de grumos. Una vez incorporada la totalidad del agua, se continuó el mezclado por 2 minutos, luego de los cuales la mezcla húmeda fue transportada mediante cintas transportadoras a la tolva de almacenamiento de la prensa. Inmediatamente después de ser producidos, los BTC fueron curados por 7 días a 100% de HR y temperatura ambiente. Luego de este período se dejaron secar por 3 semanas a temperatura y humedad ambiente en un depósito de la fábrica (20-25° C y 75% HR), tras lo cual fueron separados en diferentes lotes para evaluar su resistencia a compresión, erosión húmeda y absorción de agua.

A diferencia de los BTC producidos en el laboratorio de la UTN FRSF, estos bloques se fabricaron empleando una prensa de alta potencia diseñada y fabricada por la empresa Eco3 Ingeniería, la cual produce BTC huecos de 30 x 15 x 6.5 cm con dos agujeros de 6 cm de diámetro entregando una fuerza de compresión de 12 Tf (26 kgf/cm²).



Figura 35: Proceso de fabricación de BTC en la planta de Eco3 Ingeniería. **a)** y **b)** Dosificación en peso de la materia prima, **c)** mezclado en seco de la materia prima **d)** y **e)** vista frontal y lateral de la prensa y cinta transportadora empleadas en la fabricación de los BTC. **f)** y **g)** Prensado de un bloque, **h)** acopio de BTC para ser curados e **i)** envoltura de los BTC húmedos con un film de polietileno para favorecer su curado.

Fuente: Elaboración propia.

III.5.d Preparación de probetas para la realización de ensayos

Cada uno de los 5 BTC por serie fabricados en el laboratorio de la UTN FRFS fue cortado en 2 mitades, generando así 10 probetas por bloque, seleccionando de manera aleatoria 6 de ellas para someterlas al ensayo de resistencia a compresión simple, único ensayo realizado sobre estos bloques. Por este motivo, a todas las probetas (medios bloques) se les removió el reborde

superior -utilizado para encastrar los bloques durante la construcción de muros-, empleando una espátula metálica.

Del mismo modo, de los 15 BTC producidos por cada serie en la planta de Eco3 Ingeniería fueron seleccionados de manera aleatoria 10, los cuales se cortaron en 2 mitades iguales, generando así 20 probetas por serie, empleando 5 de ellas para la determinación de la resistencia a compresión seca, 4 para evaluar la absorción de agua por inmersión y resistencia a compresión saturada, 3 para la determinación de la resistencia a erosión húmeda y 3 para evaluar la absorción de agua por capilaridad, resguardándose los bloques y mitades restantes por posibles eventualidades.

III.6 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS PROBETAS

III.6.a Difracción de rayos X (DRX)

Las características mineralógicas de las fases minerales formadas luego de los diferentes métodos de estabilización fueron estudiadas con el difractómetro de rayos X empleado para la caracterización de la materia prima, utilizando muestras de polvo desorientado (ver apartado III.4.a.ii).

III.6.b Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)

Para determinar los cambios en la morfología y microestructura de las muestras tras los diferentes métodos de estabilización se empleó el microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (AURIGA, Carl Zeiss SMT) especificado anteriormente para la caracterización de la materia prima, recubriendo las muestras con carbono antes de ser analizadas (ver apartado III.4.a.iii).

III.6.c Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

El estudio de las fases hidratadas formadas en las series estabilizadas con puzolana y polvo de ladrillo se realizó empleando un microscopio electrónico de transmisión (Figura 36) equipado con un detector de rayos X de dispersión de energía de ventana ultradelgada de estado sólido EDAX. Las imágenes y mapas de composición elemental se obtuvieron empleando un Titan (FEI) con cañón de emisión XFEG; con el corrector de esfericidad y el detector (HAADF) funcionando a 300 kV. Las muestras de polvo se dispersaron en etanol con ultrasonido y se colocaron en rejillas de cobre [151].

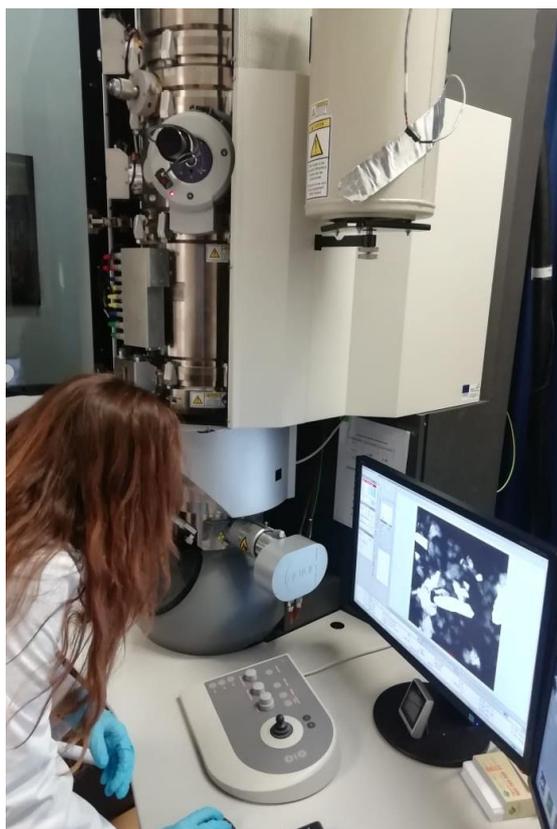


Figura 36: Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo del Centro de Instrumentación Científica (CIC) de la UGR. **Fuente.** Elaboración propia.

III.7 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS

III.7.a Determinación de la densidad seca

Se determinó la densidad seca de las probetas cilíndricas producidas en el laboratorio de la UTN FRSF y de los BTC producidos en la empresa Eco3 Ingeniería. Para ello se determinó la masa de cada elemento previamente secado (m_{seca}) con una balanza electrónica digital de 0.01 g de apreciación y se tomaron las dimensiones lineales con un calibre de 0.05 mm de apreciación para determinar su volumen (V). Para garantizar que los bloques y probetas se encontraran completamente secos antes de las determinaciones correspondientes, se mantuvieron en estufa a 105 °C durante 24 hs. Finalmente, empleando la ec. 6 pudo determinarse la densidad de cada probeta.

$$d = \frac{m_{seca}}{V} \quad (ec. 6)$$

Siendo m_{seca} la masa de las muestras secas y V su volumen.

III.7.b Resistencia a compresión seca

Para la realización de este ensayo se adoptaron los protocolos establecidos por la norma IRAM 12586:2005 para ladrillos cerámicos [56] y española UNE EN 41410:2008 [152], específica para la realización de ensayos sobre BTC.

Se ubicó cada probeta (cilindros y medios BTC) entre los suplementos metálicos verificando que la misma se encuentre perfectamente centrada y se aplicó la carga de manera continua y sin movimientos bruscos a una velocidad constante de 0.1 MPa/seg. Se registró la máxima carga soportada durante el ensayo y, dividiéndola luego por el área neta de la probeta, se obtuvo la tensión de rotura, en MPa. Las probetas se ensayaron secas, permaneciendo 21 días luego del curado en ambiente de laboratorio, a una humedad relativa de 55% y 21-25 °C de temperatura. La justificación para realizar el ensayo de resistencia a compresión sobre medios bloques sin encabezar se expone en el artículo “Resistencia a compresión en Bloques de Tierra Comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo” [53], desarrollado por el autor de esta tesis y sus directores.

Para la realización del ensayo de resistencia a compresión seca sobre las probetas de BTC se utilizó un gato hidráulico tipo “botella” con 20 Tf de capacidad, una celda de carga con apreciación de 5 kgf y capacidad máxima de 20 Tf; un pórtico de carga y 2 suplementos metálicos de 20 cm de diámetro y 1” de espesor para transmitir las cargas aplicadas de manera uniforme sobre las caras de contacto, mientras que para ensayar las probetas cilíndricas se utilizó un pórtico de carga mecánico de accionamiento manual equipado con un aro dinamométrico de 2.500 kgf de capacidad. Dada la planitud y paralelismo de las caras superior e inferior de todas las probetas, éstas fueron ensayadas sin encabezado. La realización de estos ensayos puede apreciarse en la Figura 37.

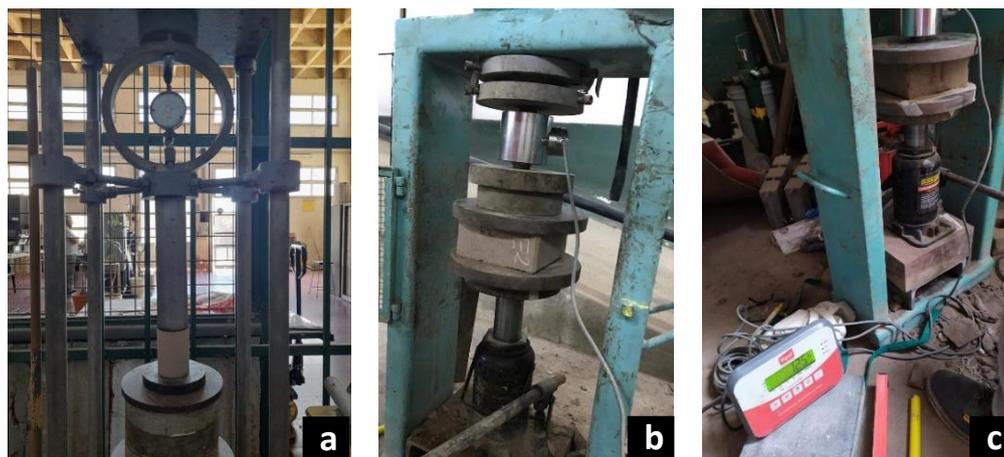


Figura 37: Realización del ensayo de resistencia a compresión seca sobre **a)** probetas cilíndricas, **b)** BTC producidos en laboratorio y **d)** BTC producidos en fábrica. **Fuente:** Elaboración propia.

III.7.c Absorción de agua por inmersión

Para determinar el grado de absorción de agua por saturación en las probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica, se realizó el ensayo de absorción por inmersión detallado en la sección 3.3 de la norma brasilera NBR 8492:2012 [87].

Las probetas (cilíndricas y medios bloques) se llevaron a una estufa a 105 °C hasta obtener masa constante, luego de lo cual se registró su peso. Una vez que alcanzaron la temperatura ambiente, fueron sumergidas en agua por 24 hs, luego de las cuales se retiraron del agua y se las lleva a condición “saturada con superficie seca” removiendo el agua superficial presente en las caras de la probeta empleando un paño húmedo. Hecho esto, se registró el peso saturado de las mismas y, por diferencia de pesos entre ambas mediciones se determinó el contenido de agua absorbido, el cual se expresó de manera porcentual respecto al peso seco. En la Figura 38 puede observarse el procedimiento realizado durante la realización de este ensayo sobre las probetas cilíndricas y los medios BTC producidos en fábrica.

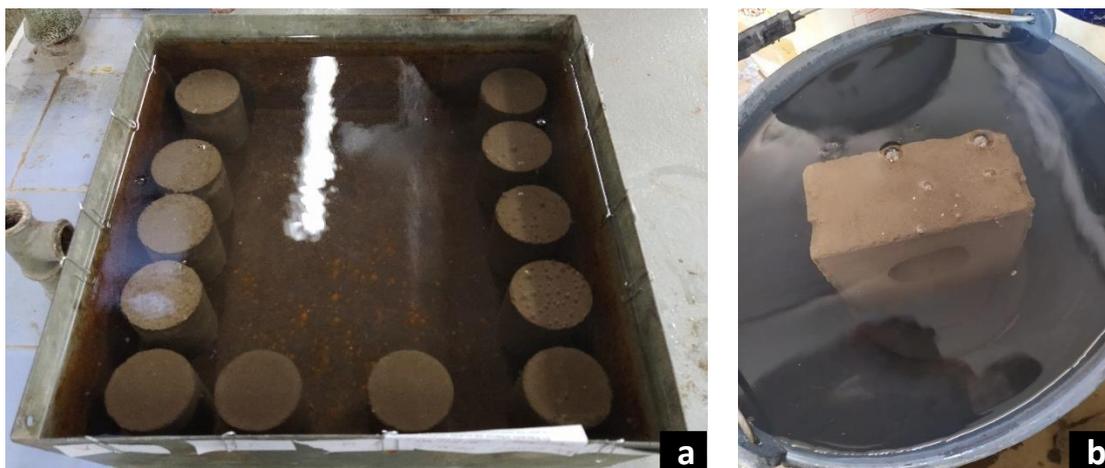


Figura 38: a) Probetas cilíndricas y b) medios BTC completamente sumergidos para la determinación de su absorción de agua por inmersión. **Fuente:** Elaboración propia.

III.7.d Resistencia a compresión saturada

Este ensayo permitió cuantificar la disminución de resistencia a compresión de las probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica cuando se encuentran saturados de agua. Para ello, se realizó el mismo ensayo descrito en el apartado III.7.b, empleando las probetas saturadas provenientes del ensayo de absorción de agua por capilaridad. Una vez determinada la resistencia a compresión de las probetas saturadas, se calculó su disminución de resistencia por saturación empleando la ec. 7:

$$r = \frac{\sigma_{\text{sat}}}{\sigma} * 100 \quad (\text{ec. 7})$$

Siendo:

- r la disminución de resistencia a compresión por saturación, en %
- σ_{sat} la resistencia media a compresión de las probetas saturadas, en MPa
- σ la resistencia media a compresión de las probetas secas, en MPa.

Para la realización de este ensayo se adoptó el protocolo estipulado por la norma brasilera ABNT 8492:2012 [87].

La realización del ensayo de resistencia a compresión saturada sobre una probeta de BTC producidos en fábrica y una probeta cilíndrica puede apreciarse en la Figura 39.

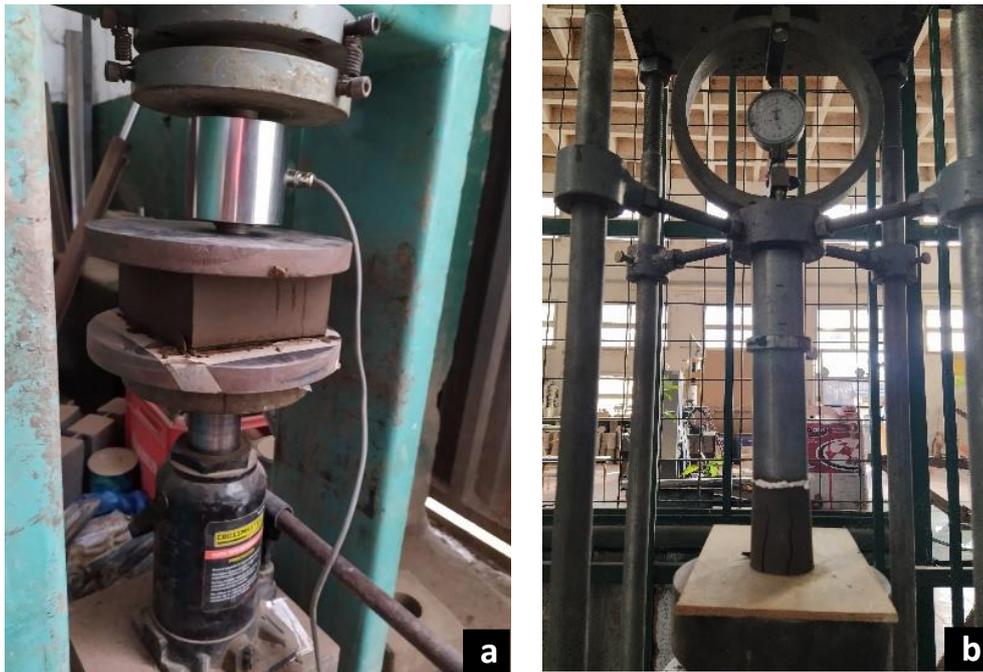


Figura 39: Determinación de la resistencia a compresión saturada de los **a)** BTC producidos en fábrica y **b)** probetas cilíndricas. **Fuente:** Elaboración propia.

III.7.e Absorción de agua por capilaridad

Con el fin de conocer la velocidad de absorción de agua por capilaridad de las probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica se realizó el ensayo estipulado por la norma española UNE 41410:2008 [152].

Antes de la realización de este ensayo, las probetas se llevaron a estufa a una temperatura de 70°C hasta verificar que su masa se mantuviese constante, registrando dicho valor (m_{seca}). Una vez alcanzada la condición seca, las probetas fueron llevadas a un desecador de manera tal de llevarlas a temperatura ambiente sin que absorban la humedad del aire.

Se midieron las dimensiones de la cara inferior de cada probeta, calculando luego el área neta (A) que se mantendrá sumergida. A continuación, se colocaron las probetas sobre un soporte de manera tal que sus caras inferiores no estuvieran en contacto con el fondo del recipiente y se agregó agua hasta que dicha cara se encontrara sumergida a una profundidad de 5 mm; a partir de este momento comenzó a registrarse el tiempo de ensayo (10 minutos), procurando mantener el nivel de agua constante a lo largo de todo el ensayo, añadiendo agua en el caso que fuera necesario.

Alcanzado el tiempo de inmersión se retiraron las probetas del agua, se escurrió el agua de la superficie empleando un paño húmedo y se pesaron, registrando así el peso húmedo (m_{hum}).

Finalmente se determinó el porcentaje de absorción de agua de cada probeta, referenciado a su peso seco.

III.7.f Resistencia a erosión húmeda

Para evaluar la resistencia a erosión húmeda de cada serie se realizó una adaptación del ensayo de pulverizado de agua a presión estipulado por las normas neozelandesa NZS 4298:1998 [113] e india 1725:2013 [153], para lo cual se introdujo cada probeta dentro del equipo de ensayo de manera tal que el lado expuesto al chorro de agua quede a 20 cm de distancia de la boquilla de aspersión, accionándose finalmente el equipo. El tiempo de exposición de cada probeta fue de 60 minutos y la presión del agua pulverizada de 1 bar. Las probetas fueron secadas en estufa a 105°C hasta obtener masa constante y pesadas antes y después de la realización del ensayo para determinar la pérdida de masa porcentual experimentada durante la prueba. Además, se midió la profundidad del patrón de erosión con una varilla metálica de 2 mm de diámetro.

En la Figura 40 se muestra el equipo empleado para la realización del ensayo de resistencia a erosión por pulverizado de agua a presión.



Figura 40: Equipo de ensayo desarrollado por el laboratorio de geotecnia de la UTN FRSF.

Fuente: Elaboración propia.

III.7.g Análisis estadístico

Para evaluar los resultados obtenidos y determinar si las variables en estudio (densidad, resistencia a compresión, absorción de agua y resistencia a erosión húmeda) de cada serie resultan estadísticamente diferentes entre sí, se realizó un análisis de varianzas ANOVA empleando el software MiniTab [154]. Este análisis permite refutar, con un 95 % de significancia la siguiente hipótesis: “Las variables en estudio de cada serie son estadísticamente iguales entre sí”. Si el valor del estadístico P arrojado por el software es inferior a 0.05, puede refutarse con un 95% de confianza la hipótesis propuesta, con lo cual, puede asegurarse que al menos una serie de probetas posee propiedades diferentes que las demás [155].

Como ANOVA únicamente posibilita determinar si la variable en estudio –por ejemplo, resistencia a compresión seca- es estadísticamente diferente entre las diversas series de probetas, pero no especifica sobre cuáles son las series con resistencia similar, o cuales son las series de mayor y menor resistencia; se efectuó además un “Análisis de parejas de Tukey”, empleando también el software MiniTab, el cual posibilita identificar las series de probetas que presentan resistencias medias estadísticamente similares entre sí, y cuáles son las series con mayor y menor resistencia media a compresión asignándoles un factor de grupo; las series que no compartan el factor de grupo, son significativamente diferentes. Este análisis se realizó con todas las propiedades físicas y mecánicas evaluadas.

III.8 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

III.8.a Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Finalmente, para evaluar el efecto del impacto ambiental de los BTC estabilizados con diferentes contenidos cemento Portland, cal y adiciones minerales, se empleó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) propuesta por la norma IRAM-ISO 14040:2017 [130], la cual permite caracterizar y cuantificar los diversos impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas de la vida útil de un producto o sistema [156]. Para realizar el análisis de inventario propuesto por la IRAM-ISO 14040:2017 se empleó el software SimaPro9 [131].

Se adoptaron como unidades funcionales BTC individuales de 15 x 30 x 6.5 cm con dos agujeros de 6 cm de diámetro y una masa de 4 kg, cada uno de ellos con un contenido de cal o cemento diferente, coincidentes con la dosificación de los bloques BTC producidos en laboratorio -con

diferentes contenidos de cal y cemento Portland- y probetas cilíndricas, las cuales se exponen en la Tabla 10.

Tabla 10: Dosificación en peso de las diferentes series de BTC empleadas para la evaluación de su impacto ambiental. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie		Tierra (%)	Arena (%)	Cal (%)	Cemento (%)	Puzolana (%)	P. ladrillo (%)
Cemento	Cto 0% (II)	50.0	50.0	-	0.0	-	-
	Cto 2.5%	48.75	48.75	-	2.5	-	-
	Cto 5%	47.5	47.5	-	5.0	-	-
	Cto 10% (III)	45.0	45.0	-	10.0	-	-
	Cto 15%	42.5	42.5	-	15.0	-	-
	Cto 20%	40.0	40.0	-	20.0	-	-
Cal	Cal 0% (I)	70.0	30.0	0.0	-	-	-
	Cal 2,5%	68.25	29.25	2.5	-	-	-
	Cal 5%	66.5	28.5	5.0	-	-	-
	Cal 10% (IV)	63.0	27.0	10	-	-	-
	Cal 15%	59.5	25.5	15	-	-	-
	Cal 20%	56.0	24.0	20	-	-	-
Adiciones	Puzolana 3% (V)	63.0	27.0	7.0	-	3.0	-
	P. ladrillo 3% (VI)	63.0	27.0	7.0	-	-	3.0
	Puzolana 5% (VII)	63.0	27.0	5.0	-	5.0	-
	P. ladrillo 5% (VIII)	63.0	27.0	5.0	-	-	5.0

El alcance del estudio se limitó al enfoque denominado “de la cuna a la puerta”, mediante el cual se consideran únicamente los flujos de entrada y salida de las etapas comprendidas entre la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación de los bloques hasta que éstos se encuentran terminados y listos para insertarse en el mercado, fuera de la planta de producción [6]. Para cuantificar el impacto asociado al transporte de las materias primas desde su punto de extracción o adquisición se adoptaron las siguientes consideraciones:

- **Unidad productiva:** El modelo de análisis se basó en la Fábrica de BTC Mobak, ubicada en la comuna de Arroyo Leyes (Santa Fe), con una capacidad productiva de 3.000 BTC diarios. Se adoptó esta unidad productiva en lugar de la empresa Eco3 Ingeniería -donde se fabricaron los BTC ensayados en esta tesis- por su elevado nivel de mecanización y automatismo durante el proceso de producción y mayor nivel de producción diaria.

- Tierra: La cantera de extracción de la tierra se encuentra en la comuna de Monte Vera (Santa Fe), a 35 km de distancia de la fábrica.
- Arena: La adquisición de la arena empleada en la fabricación de los bloques se realiza en una arenera de la Ciudad de Santa Fe, a 19 km de distancia de la unidad productiva.
- Polvo de ladrillo: Se produce en un corralón de la ciudad de Santa Fe, moliendo ladrillos cocidos fabricados en la comuna de Monte Vera, a 36 km de distancia de la unidad productiva.
- Puzolana: A pesar de su gran disponibilidad comercial en la ciudad de Santa Fe, este material proviene de una cantera cercana al poblado de Pareditas, en la provincia de Mendoza, a 1.015 km de la planta de producción de los BTC.
- Estabilizantes: Se consideró la utilización de cal aérea hidratada en bolsas de 25 kg y cemento Portland en bolsas de 50 kg, ambos adquiridos en un corralón ubicado al norte de la ciudad de Santa Fe, a 35 km de la fábrica.
- Transporte: Para el transporte de la tierra, la arena y el polvo de ladrillo se consideró la utilización de un camión tipo euro3 de 16-32 tn de capacidad, mientras que para el transporte de los estabilizantes se consideró un camión euro3 de 7.5-16 tn de capacidad y para la puzolana un camión tipo euro3 de 32-45 tn. Estas categorías de vehículos se adoptaron siguiendo los requisitos estipulados por la Norma 5 de la Unión Europea [157].
- Extracción y producción de materia prima: para cuantificar el impacto asociado a la extracción y comercialización de la tierra, arena y puzolana, y la producción del polvo de ladrillo, cal y cemento con su correspondiente distribución hacia los centros de comercialización se empleó la base de datos Ecoinvent3 presente en el software SimaPro [131].

III.8.b Trabajo de campo

Para cuantificar el consumo de energía y recursos y los descartes residuales correspondientes a la etapa de fabricación de este tipo de bloques se efectuaron visitas de campo a la empresa productora de BTC "Mobak", registrando *in situ* los datos requeridos.

En cada visita efectuada se tomaron notas de la cantidad, proporción y origen de las materias primas utilizadas para producir los BTC, así como el destino final del producto ya manufacturado, con el fin de determinar las distancias de traslado. Se documentó el proceso de producción,

especificando las etapas, máquinas y tipo de energía utilizada en cada una de las fases del proceso. Se registró además el nombre, marca y modelo de la maquinaria utilizada, su capacidad productiva y la eficiencia energética de cada operación expresada en unidades de energía. Además, se registraron los distintos medios de transporte empleados, su capacidad de carga y las distancias recorridas.

En la Figura 41 se muestran algunos equipos de producción empleados y el almacén final de bloques de la empresa Mobak, mientras que en la Figura 42 se resume el proceso productivo empleado en la fabricación de sus BTC donde, a diferencia de las dosificaciones propuestas para esta investigación, incorporan dos tipos de arena con diferentes granulometrías, cal y cemento para la estabilización.



Figura 41: Equipamiento empleado en la producción de los BTC y almacén final de la empresa Mobak.
Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

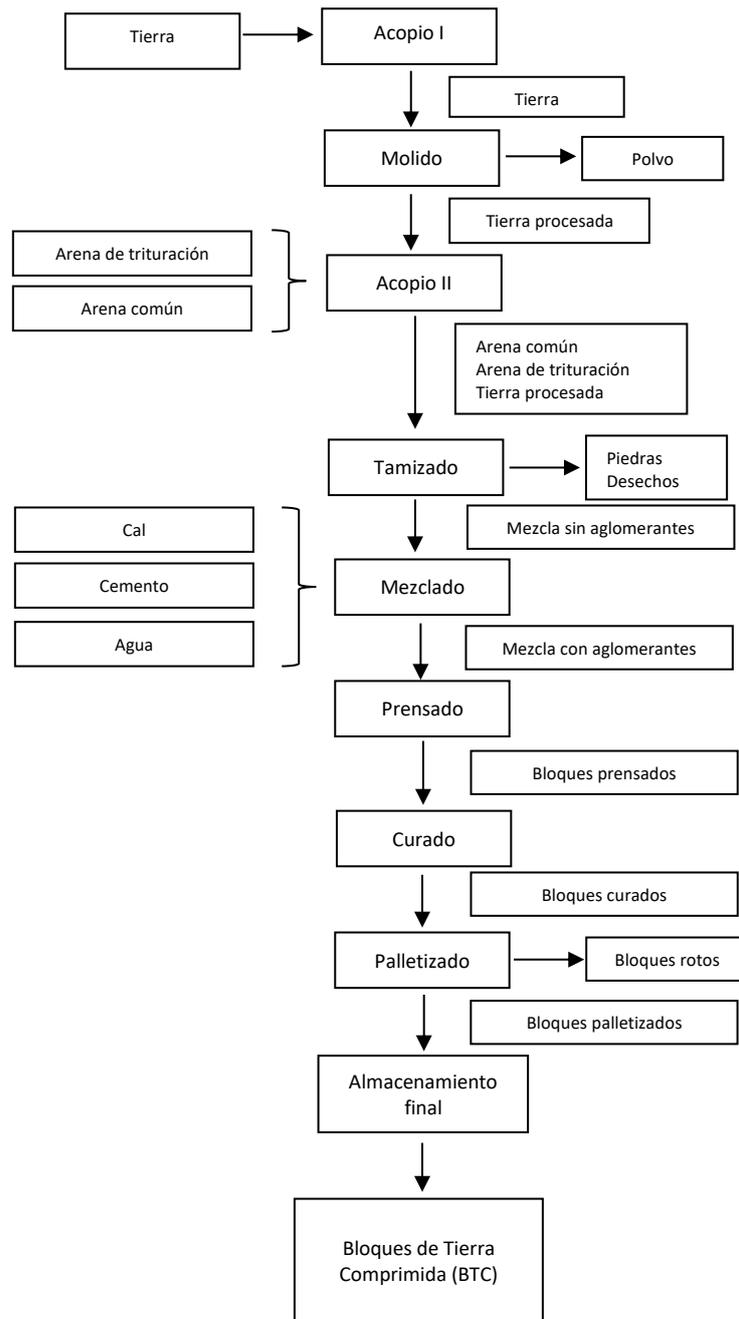


Figura 42: Diagrama de flujo de la producción de los BTC producidos por la empresa Mobak.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

IV.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS MATERIALES

IV.1.a Análisis granulométrico

Combinando los resultados del tamizado mecánico, tamizado húmedo e hidrometría se confeccionó la curva granulométrica completa de la tierra, la cual puede apreciarse en la Tabla 11 y en la Figura 43; en ellas se indican los contenidos porcentuales -en peso- de cada tamaño de partícula. Además, en la Tabla 12 se resume la composición por tamaños de las partículas de tierra.

Tabla 11: Resultados del análisis granulométrico por vía mecánica e hidrometría de la tierra.
Fuente: Elaboración propia.

	Tamiz	Tiempo	Densidad relativa	Tamaño (mm)	Pasante (%)
Tamizado	#40	-		1.022	100.00
	#60	-		1.018	98.00
	#100	-		1.015	95.00
	#200	-		1.014	85.50
Hidrometría	-	2´	1.022	0.0282	78.36
	-	5´	1.018	0.0195	67.89
	-	10´	1.015	0.0143	59.14
	-	15´	1.014	0.0118	55.93
	-	30´	1.0125	0.0085	51.13
	-	1 h	1.011	0.0061	46.32
	-	2 hs	1.01	0.0042	41.09
	-	4 hs	1.009	0.0030	36.21
	-	6 hs	1.0085	0.0026	34.23
	-	24 hs	1.007	0.0013	31.95
	-	48 hs	1.0065	0.0012	31.91

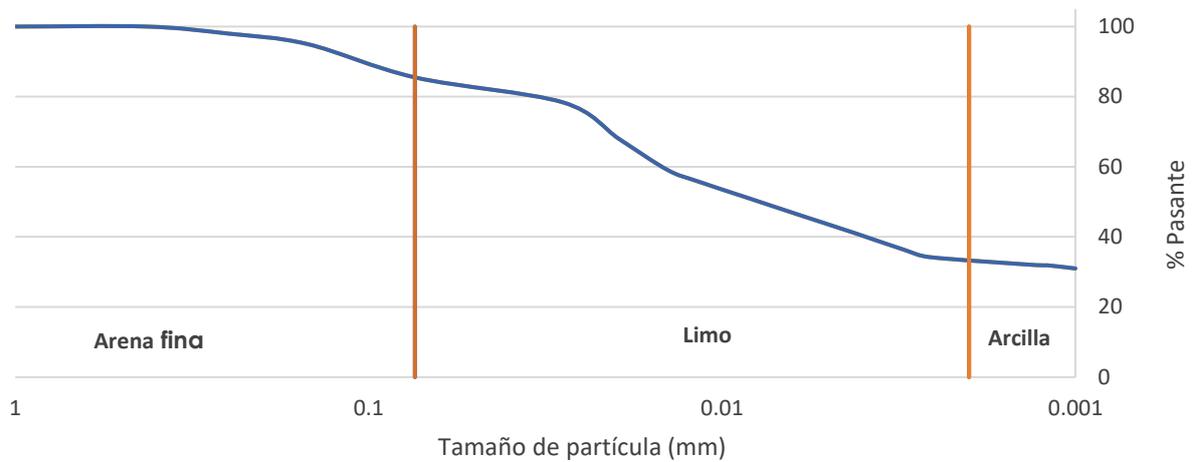


Figura 43: Distribución granulométrica de la tierra. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 12: Composición por tamaño de las partículas de la tierra. **Fuente:** Elaboración propia.

Partícula	Tamaño (mm)	Contenido (%)
Arena gruesa	2.0 - 0.25	0
Arena fina	0.25 - 0.075	14.5
Limo	0.075 - 0.002	53.6
Arcilla	<0.002	31.9

En la Tabla 13 y Figura 44 se expresa la distribución granulométrica de la arena, puzolana y polvo de ladrillo. Debe recordarse que para la confección de las diferentes series de probetas cilíndricas y BTC, tanto el polvo de ladrillo como la puzolana fueron molidos hasta pasar por el tamiz #200.

Tabla 13: Resultados del análisis granulométrico mecánico de la materia prima.
Fuente: Elaboración propia.

Tamiz		Pasante (%)		
ASTM	IRAM (mm)	Arena	Puzolana	P. Ladrillo
3/8"	9.5	100.0	100.0	100.0
# 4	4 3/4	100.0	98.9	92.0
# 10	2	99.8	95.3	78.0
# 20	0.85	95.9	88.9	52.0
# 40	0.425	89.0	79.1	49.3
# 60	0.25	60.6	72.5	36.4
# 100	0.15	23.8	58.8	21.9
# 200	0.075	0.9	12.1	3.1

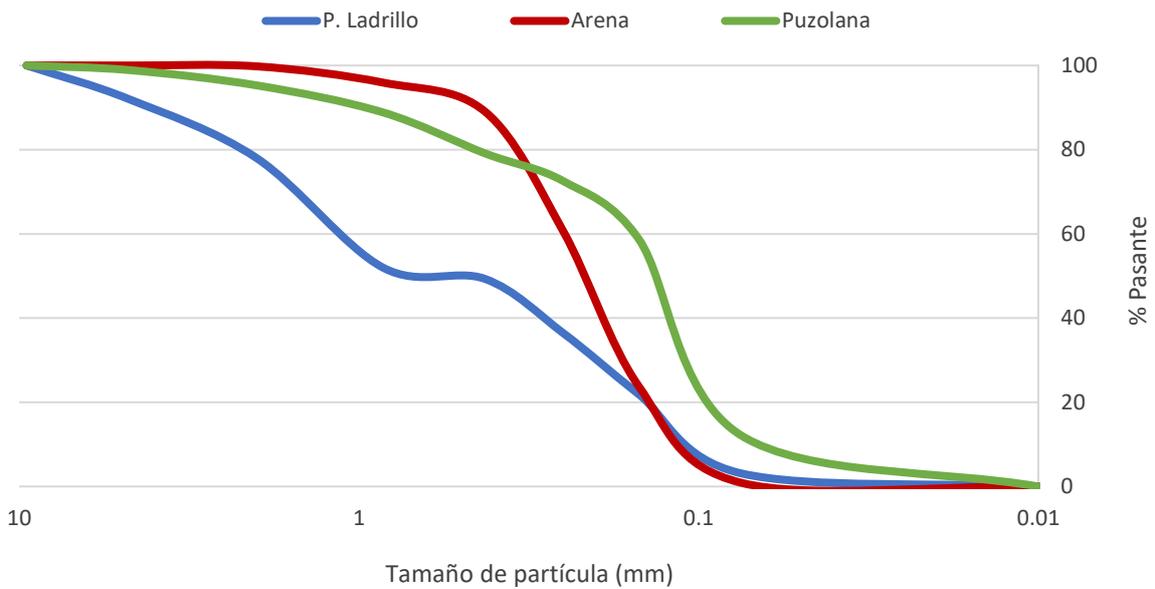


Figura 44: Distribución granulométrica de la materia prima. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.1.b Densidad aparente

En la Tabla 14 se exponen los resultados de la determinación de la densidad aparente de los materiales empleados.

Tabla 14: Densidad aparente de la materia prima. **Fuente:** Elaboración propia.

Material	Volumen (ml)	Masa (g)	Densidad (Kg/m ³)
Tierra	250	290.33	1161.33
Arena	250	388.67	1554.67
Puzolana	250	192.33	769.33
Polvo de Ladrillo	250	289.33	1157.33
Cal	100	59.67	596.67
Cemento	100	90.08	900.80

IV.1.c Caracterización de la tierra

IV.1.c.i Límites de átterberg y clasificación

En la Figura 45 se muestra la realización de los ensayos efectuados para determinar los límites de Átterberg de la tierra, mientras que su contenido de material fino (pasante por el tamiz #200) y clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos "SUCS" [158] y el Sistema de Clasificación de Suelos de la Highway Research Board "HRB" [159] pueden apreciarse en la Tabla 15. Además, En el Anexo I se presentan 2 planillas de identificación de suelos aportadas por la Dirección Provincial de Vialidad (Santa Fe) según las cuales, partiendo de la distribución granulométrica y límites de Átterberg, puede identificarse de manera gráfica el tipo de tierra disponible.



Figura 45: a) Determinación del límite líquido y b) límite plástico de la tierra.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Límites de Átterberg, contenido de partículas finas y clasificación de la tierra empleada.
Fuente: Elaboración propia.

Caracterización de la tierra	
Límite Líquido	27
Límite Plástico	16
Índice de Plasticidad	11
Pasante #200	85.5
SUCS	CL
HRB	A-6 (0)
Tipo de suelo	Arcilla de baja plasticidad (limosa)

IV.1.c.ii Contracción lineal

La contracción lineal de la tierra, determinada según el método especificado en el apartado III.3.c.iii del capítulo anterior puede apreciarse en la Tabla 16. En la Figura 46 se expone la probeta prismática seca sobre la cual se midieron las dimensiones finales.

Tabla 16: Contracción lineal de la tierra. **Fuente:** Elaboración propia.

Humedad (%)	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Contracción lineal (%)
27	99.70	95.40	4.31



Figura 46: Probeta seca empleada para la determinación del índice de contracción lineal.
Fuente: Elaboración propia.

IV.1.c.iii Contenido de materia orgánica

En la Tabla 17 se exponen los resultados de las 4 determinaciones realizadas para conocer el contenido de materia orgánica de la tierra.

Tabla 17: Contenido de materia orgánica de la tierra. **Fuente:** Elaboración propia.

ID _{muestra}	A	B	C	D
P _{s seco} (g)	1.0086	1.0008	1.0005	1.0006
1° P _{s calcinado} (g)	0.9821	0.9735	0.9718	0.9735
2° P _{s calcinado} (g)	0.9819	0.9730	0.9719	0.9729
Δm_{prom} (g)	0.0266	0.0275	0.0286	0.0274
MO (%)	2.64	2.75	2.86	2.74
MO Prom (%)	2.75			

IV.1.c.iv Contenido de sales solubles

En la Figura 47 se muestra el estado de la dispersión de tierra en agua destilada luego de reposar 24 hs para la determinación del contenido de su contenido de sales solubles. La turbidez que se observa indica que el contenido de sales solubles en la muestra de tierra, según lo especificado por la norma de referencia [142], es inferior al 0.1%.



Figura 47: Resultados del ensayo para la determinación del contenido de sales solubles presentes en la tierra luego de **a)** 1 minuto y **b)** 24 hs. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES

IV.2.a Cal útil vial

En la Tabla 18 se muestran los contenidos de hidróxido de calcio, carbonato de calcio e impurezas de la cal comercialmente disponible en la ciudad de Santa Fe, determinados por titulación con ácido clorhídrico e hidróxido de sodio.

Tabla 18: Contenidos de Ca(OH)_2 y CaCO_3 determinados por titulación con HCl y NaOH.

Fuente: Elaboración propia.

Cal	Ca(OH)_2	CaCO_3	impurezas
Andina	74.12	22.37	3.51
Blancaley	29.54	22.4	48.01

Dado el bajo contenido de hidróxido de calcio de la cal Blancaley, se optó por no emplearla en la fabricación de probetas y BTC, motivo por el cual no se le realizaron más ensayos de caracterización. En los apartados y capítulos siguientes, todas las menciones a las características y propiedades de la cal se refieren con exclusividad a la cal Andina.

IV.2.b Ensayos analíticos

IV.2.b.i Fluorescencia de rayos X (FRX)

En la Tabla 19 y 20 puede apreciarse el contenido porcentual -en peso- de los diferentes elementos que componen la materia prima empleada para la fabricación de las probetas y BTC de esta tesis. Es importante aclarar que los porcentajes se refieren al total de los elementos detectados por cada filtro (indicados en la 2° línea de las tablas), no siendo válida la comparación de valores entre tablas diferentes.

Tabla 19: Composición elemental en peso de la materia prima, referida a los elementos detectados por el filtro "Soils". **Fuente:** Elaboración propia.

Muestra	Composición en peso (%)						
	Ca	K	Mn	S	Fe	Ti	Otros elementos
Arena	27.24	33.47	1.01	-	27.18	7.44	3.66
Tierra	19.07	35.88	1.08	-	31.18	11.78	1.01
Puzolana	28.54	50.31	-	7.86	10.23	1.61	1.45
P. ladrillo	19.39	29.47	1.01	-	41.76	7.36	1.01
Cal	99.72	-	-	-	-	-	0.28
Cemento	90.99	2.73	-	2.84	2.84	-	0.60

Tabla 20: Composición elemental en peso de la materia prima, referida a los elementos detectados por el filtro "General Metals". **Fuente:** Elaboración propia.

Muestra	Composición en peso (%)					
	Ti	Fe	Al	Si	Mg	Otros elementos
Arena	-	1.87	1.27	96.86	-	0.00
Tierra	1.22	11.72	9.24	77.51	-	0.31
Puzolana	-	6.14	11.37	82.13	-	0.36
P. ladrillo	1.41	19.00	13.08	66.02	-	0.49
Cal	-	1.39	23.17	29.86	45.57	0.01
Cemento	1.43	11.48	14.85	56.83	14.98	0.43

IV.2.b.ii Difracción de Rayos X (DRX)

En la Tabla 21 se muestran los resultados de la semicuantificación de minerales realizada por DRX, indicando el porcentaje de cada fase mineral presente en cada una de las muestras de la materia prima, con excepción de la puzolana (cuyo elevado contenido de compuestos amorfos imposibilitó a tarea) y el cemento Portland, cuyas fases minerales no pudieron ser cuantificadas pero sí identificadas, exponiéndose en la Tabla 22. Se remarca el hecho de que en los difractogramas de la Figura 48 y Figura 49 la albita, microclina, ortoclasa y anortita se cuantifican en la Tabla 21 como minerales del grupo de los feldespatos, mientras que la esmectita, illita y caolinita como minerales del grupo de las arcillas.

Tabla 21: Semicuantificación de los diferentes grupos de minerales presentes en la materia prima.

Fuente: Elaboración propia.

Materia Prima	Calcita (%)	Portlandita (%)	Cuarzo (%)	Dolomita (%)	Hematita (%)	Arcillas (%)	Feldespatos (%)
Cal	31.5	66.9	1.6	-	-	-	-
Arena	-	-	95	1	-	1	3
P. Ladrillo	-	-	54	-	5	30	11
Tierra	-	-	65	1	-	25	9
Puzolana	(*) No resultado posible realizar la cuantificación						

Tabla 22: Fases minerales identificadas por DRX en las muestras de cemento Portland.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre del compuesto	Formula química
Silicato tricálcico	Ca_3SiO_5
Calcita	CaCO_3
Aluminato tricálcico	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$
Silicato bicálcico	Ca_2SiO_4
Sulfato de calcio hemihidratado	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$
Sulfato de calcio dihidratado	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Ferroaluminato de calcio	$\text{Ca}_2(\text{Al}_{0.69}\text{Fe}_{0.31})_2\text{O}_5$

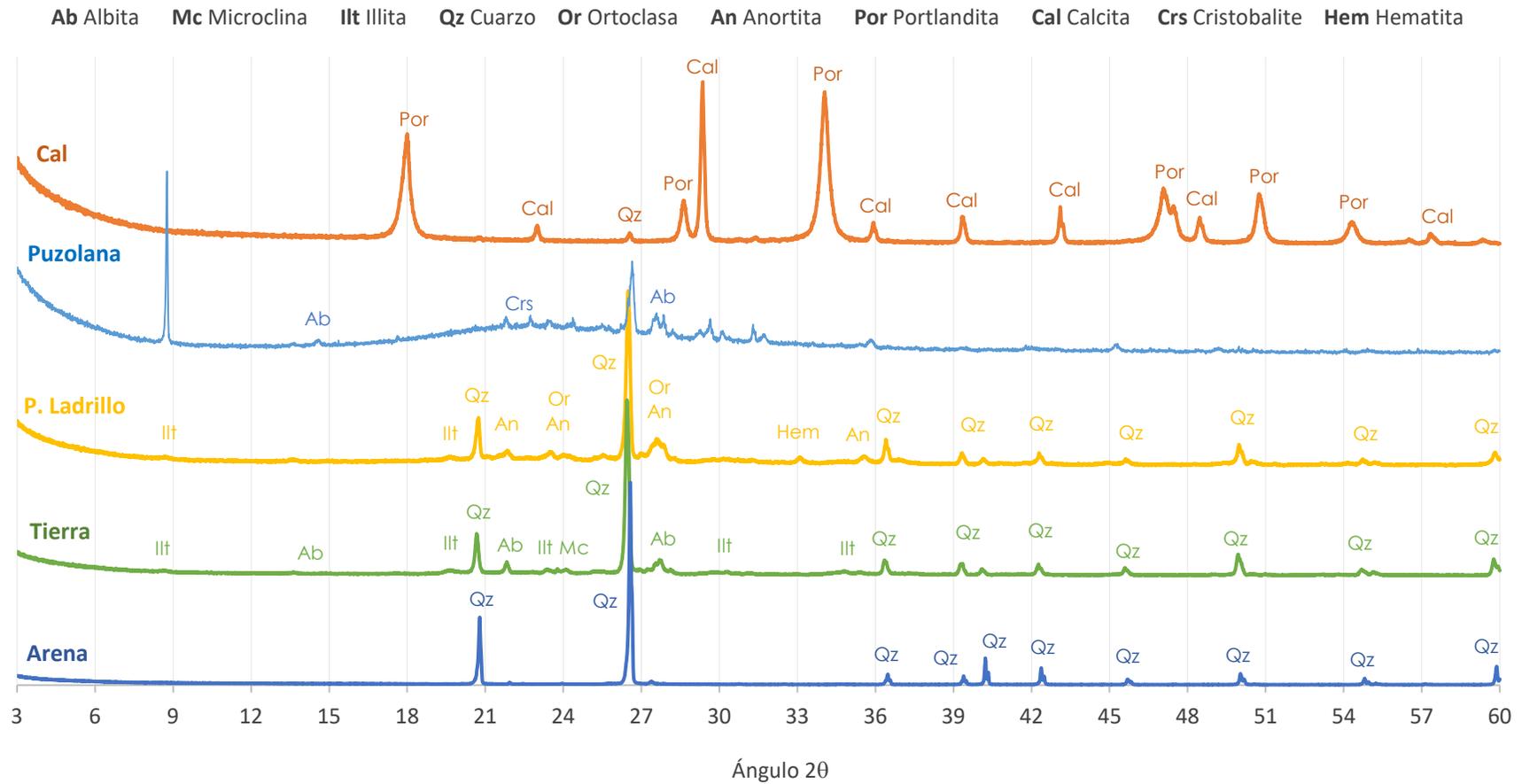


Figura 48: Difractogramas de muestras de polvo desorientado de la materia prima. Fuente: Elaboración propia.

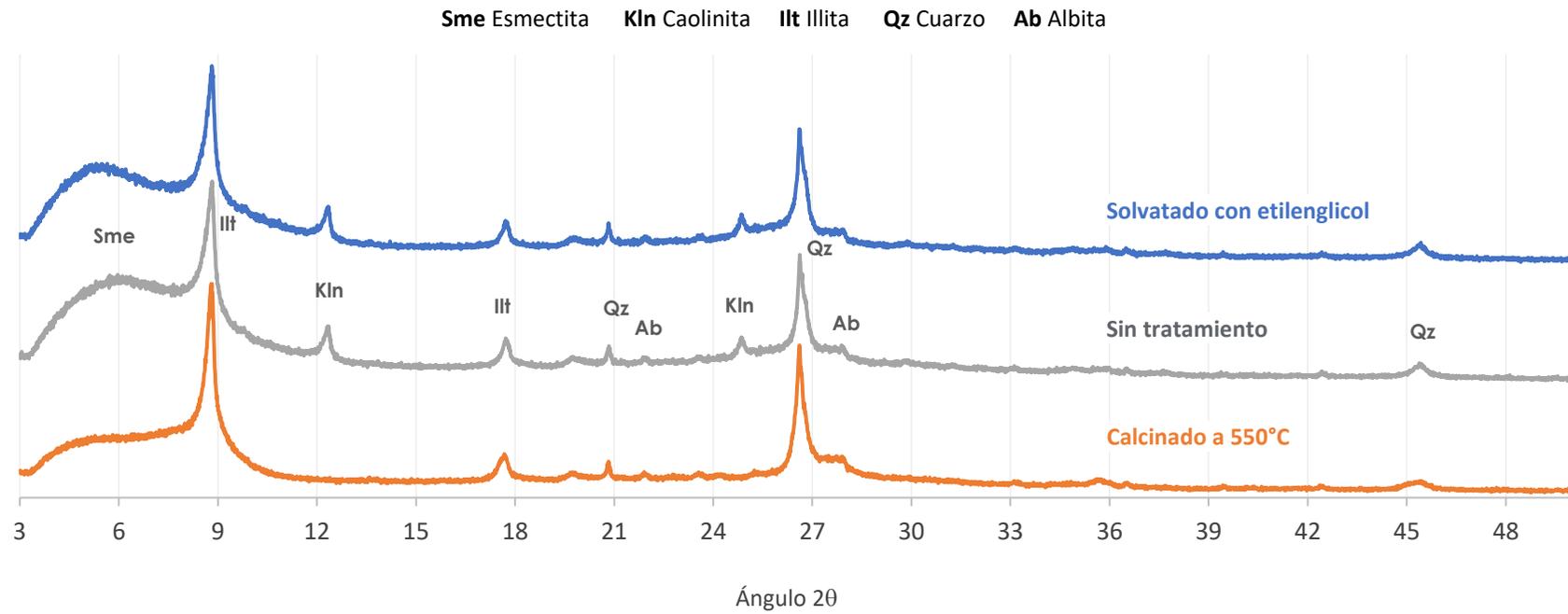


Figura 49: Difractogramas de agregados orientados de la fracción arcilla de la tierra sin tratamiento, expandida con etilenglicol y calcinada a 550°C.
Fuente: Elaboración propia.

IV.2.b.iii Microscopía electrónica de barrido (FESEM) y espectrometría de dispersión de energía (EDS)

Entre la Figura 50 y la Figura 60 se expone la morfología superficial y microestructura de la materia prima empleada, determinada por FESEM, como así también su composición química determinada de manera cualitativa por EDS.

Ing. Santiago Cabrera

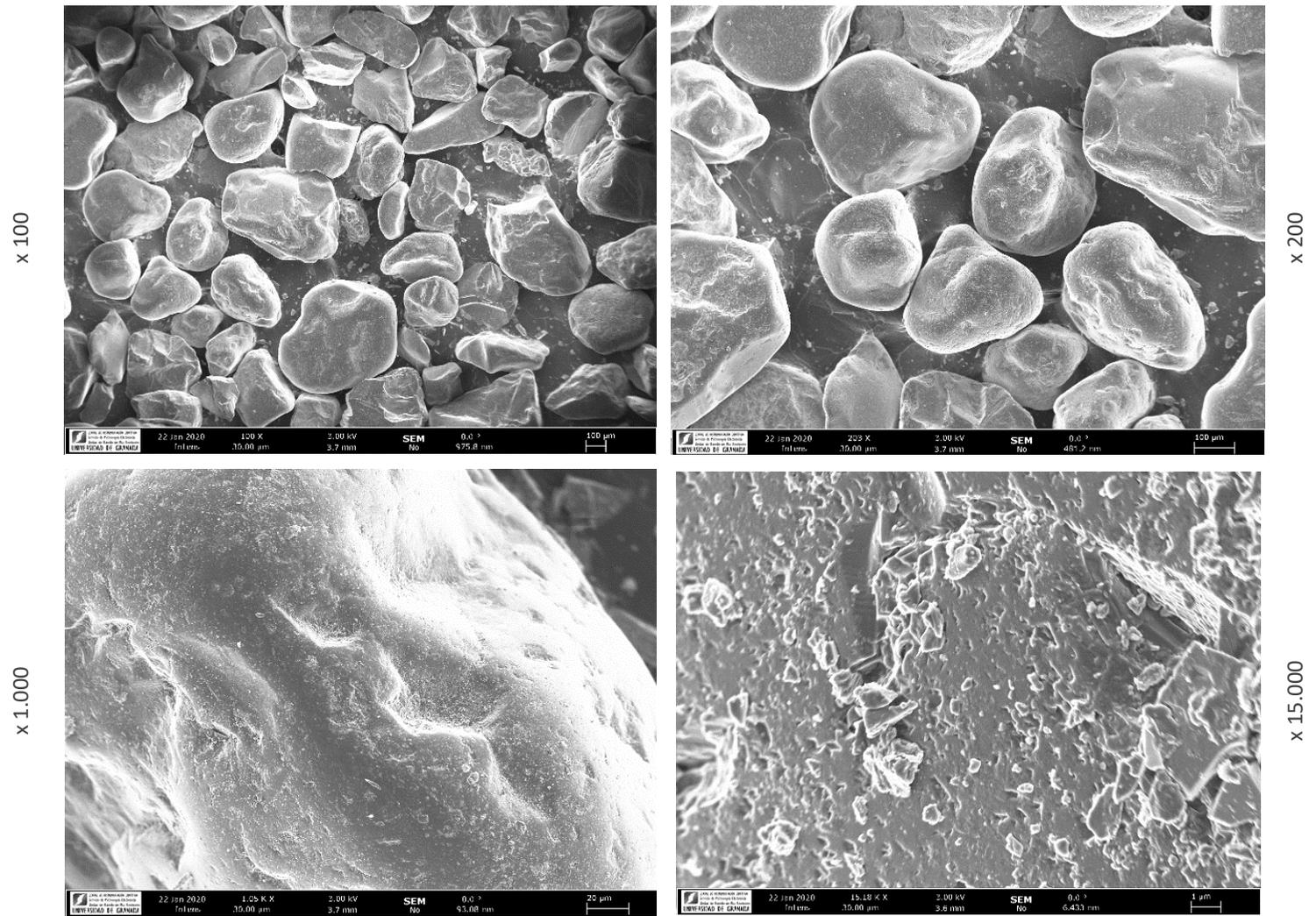


Figura 50: imágenes FESEM con diferentes aumentos de una muestra de arena. Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

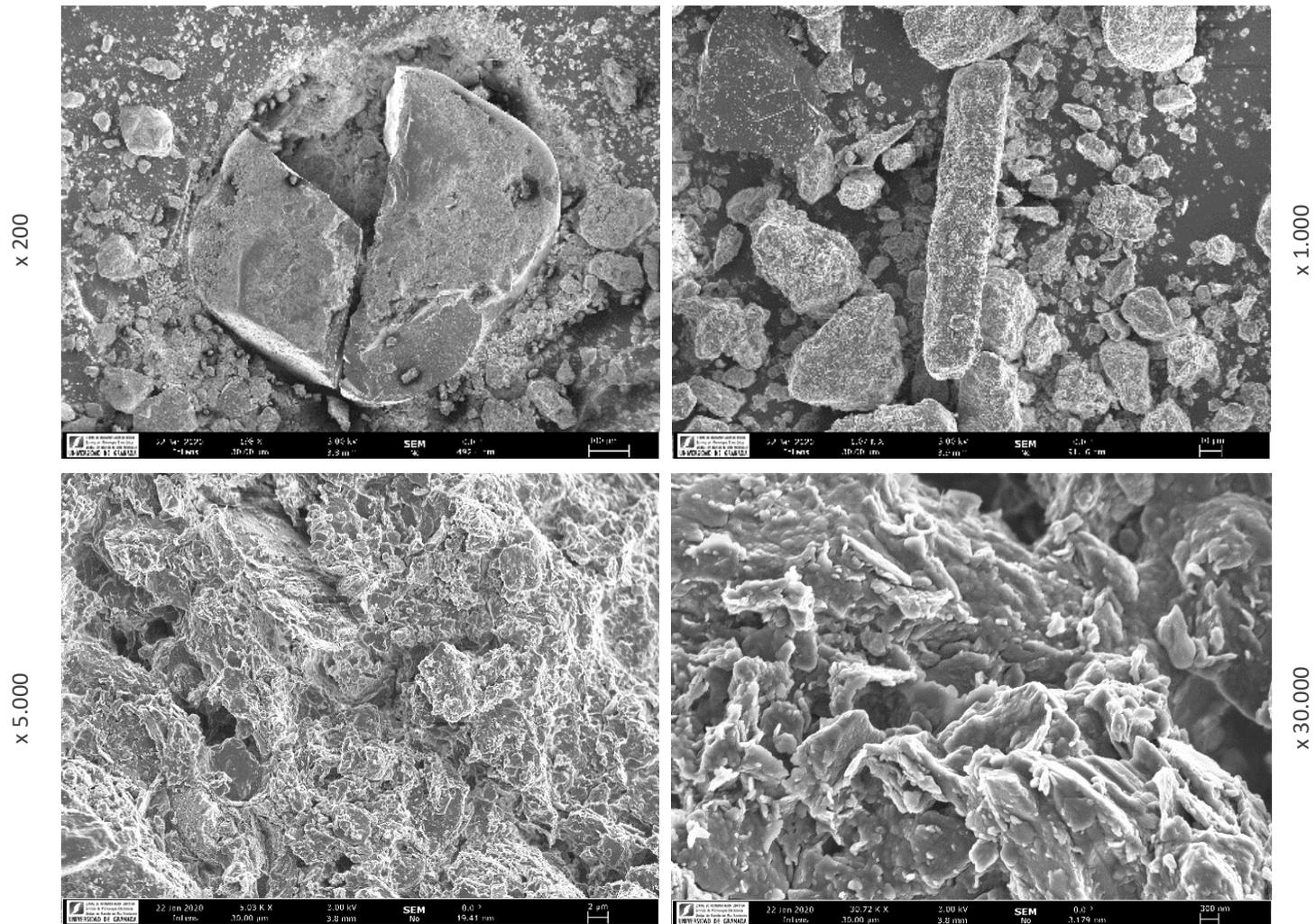


Figura 51: imágenes FESEM con diferentes aumentos de una muestra de tierra.

Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

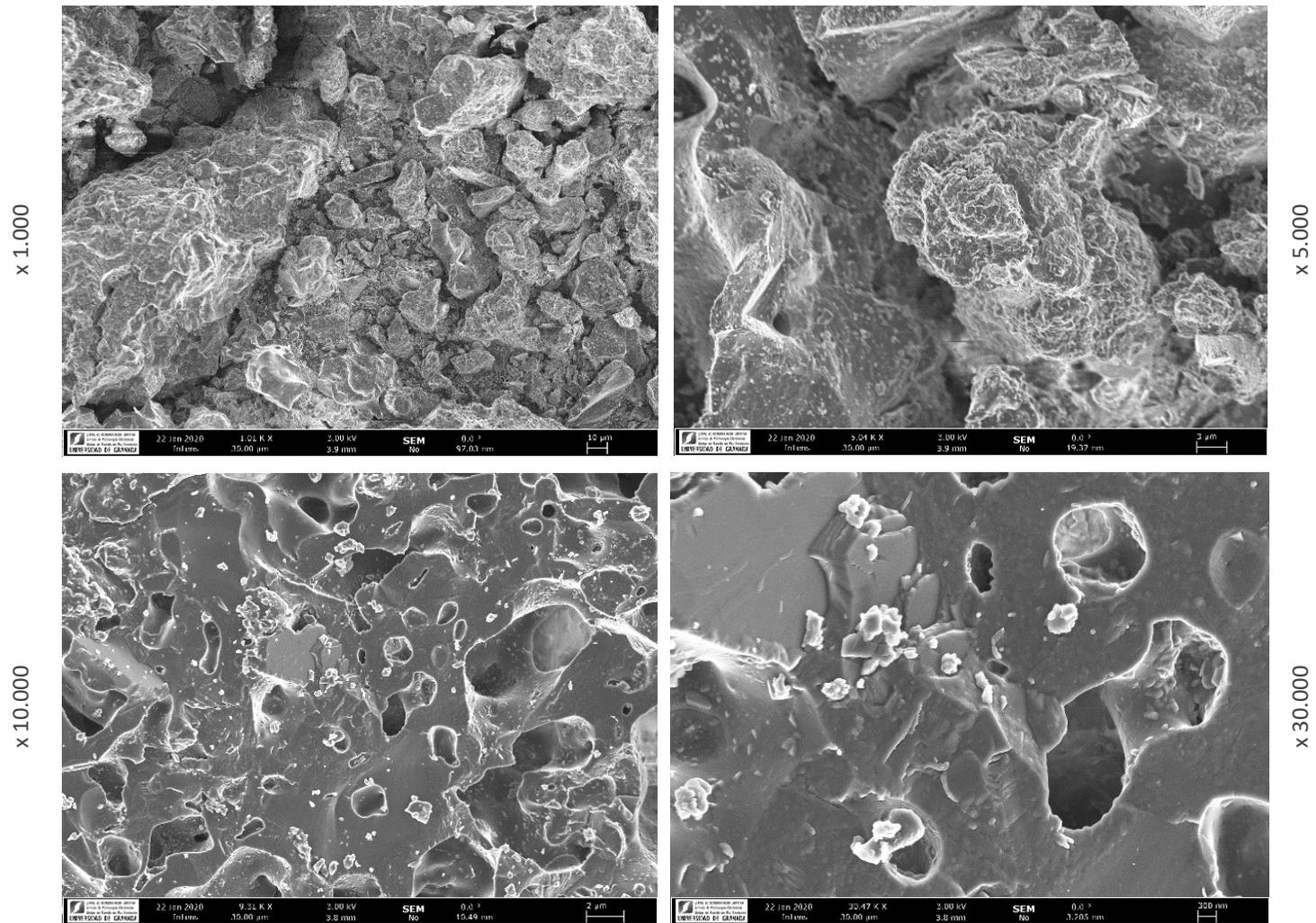


Figura 52: imágenes SEM con diferentes aumentos de una muestra de polvo de ladrillo.

Fuente: Elaboración propia.

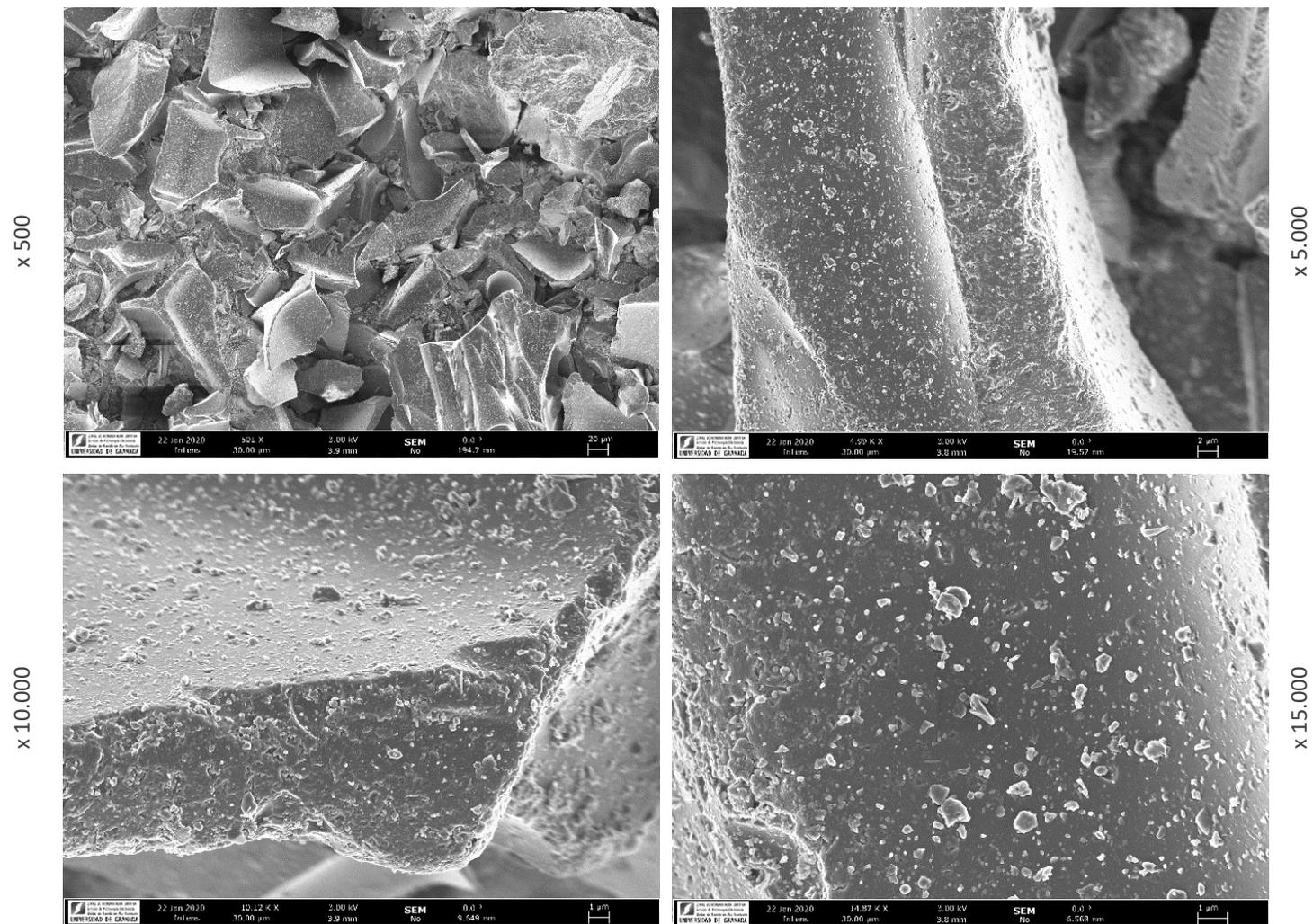


Figura 53: imágenes SEM con diferentes aumentos de una muestra de puzolana. Fuente: Elaboración propia.

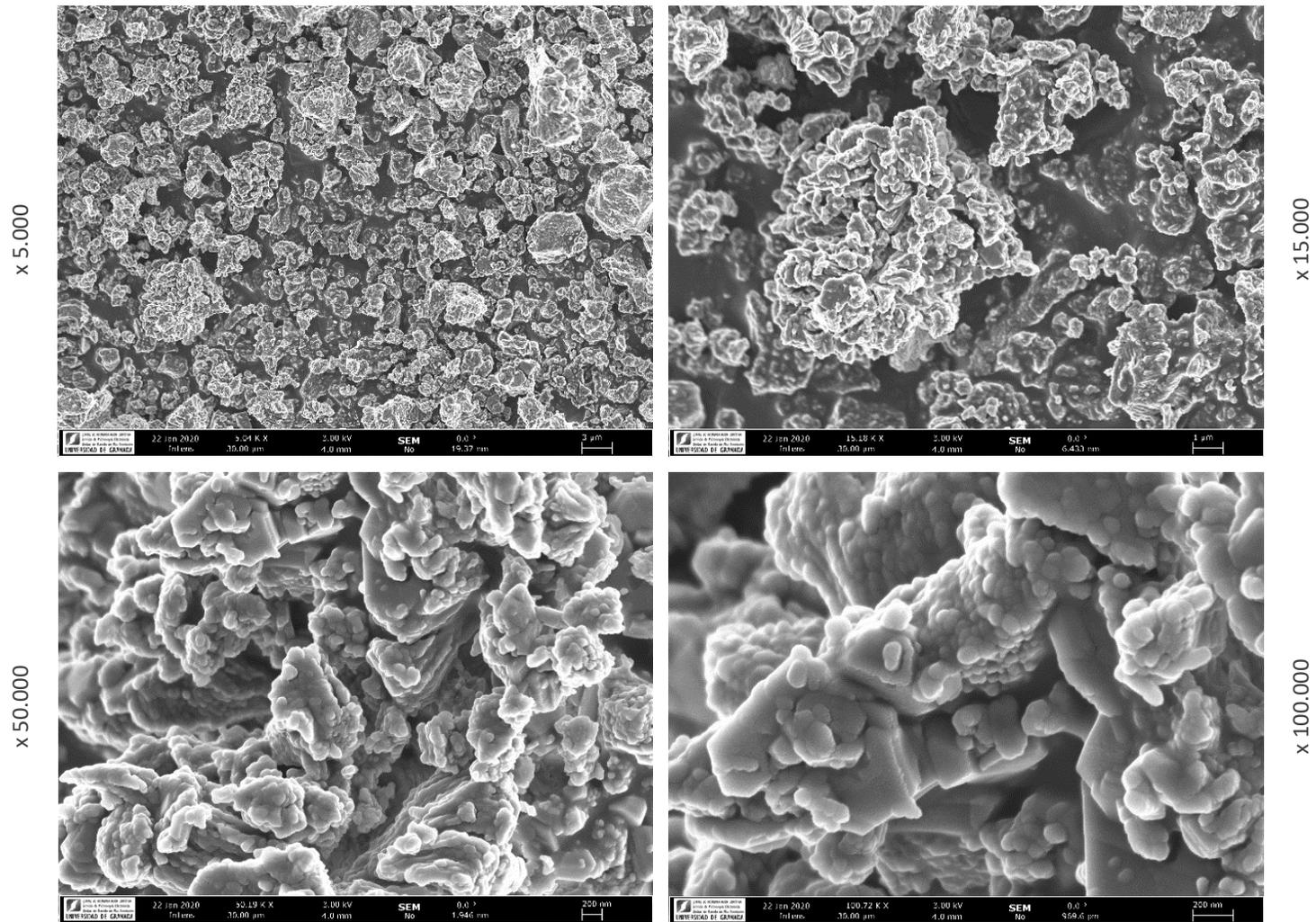


Figura 54: imágenes SEM con diferentes aumentos de una muestra de cal. Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

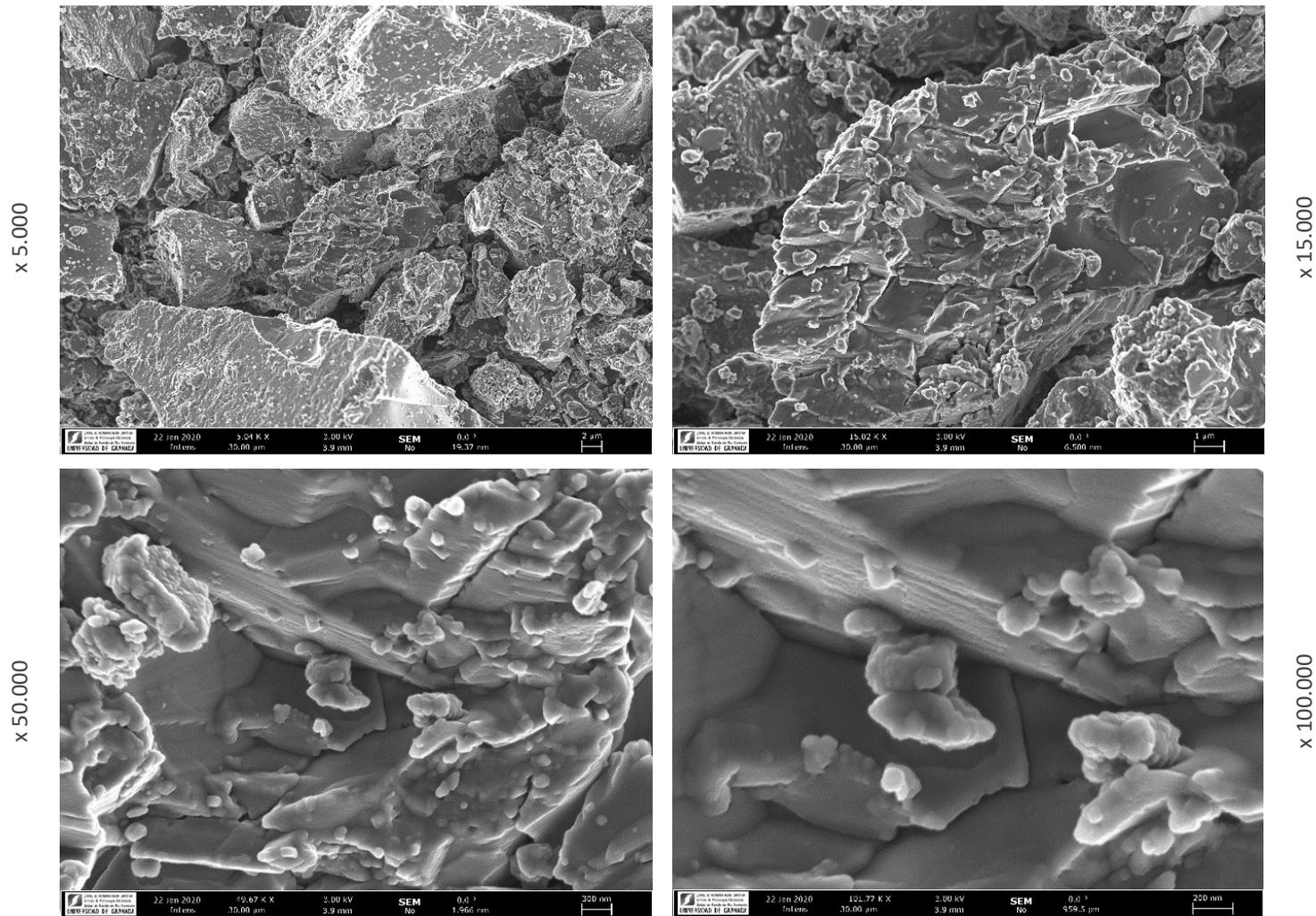


Figura 55: imágenes SEM con diferentes aumentos de una muestra de cemento Portland.

Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

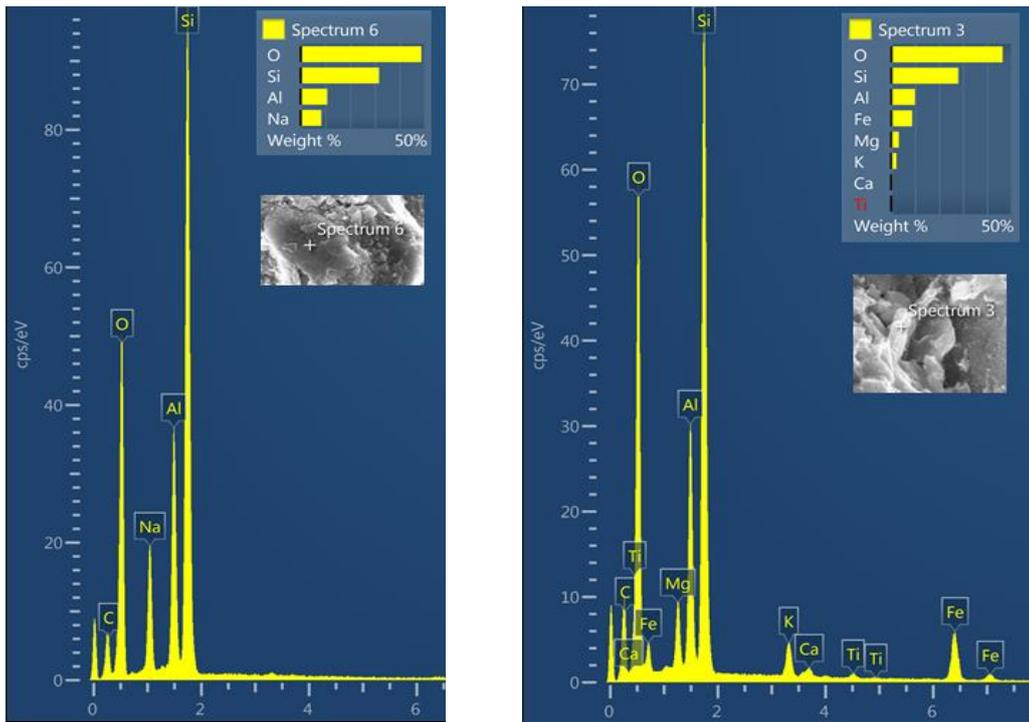


Figura 56: Composición elemental de una muestra de tierra determinada por EDS en 2 puntos diferentes. **Fuente:** Elaboración propia.

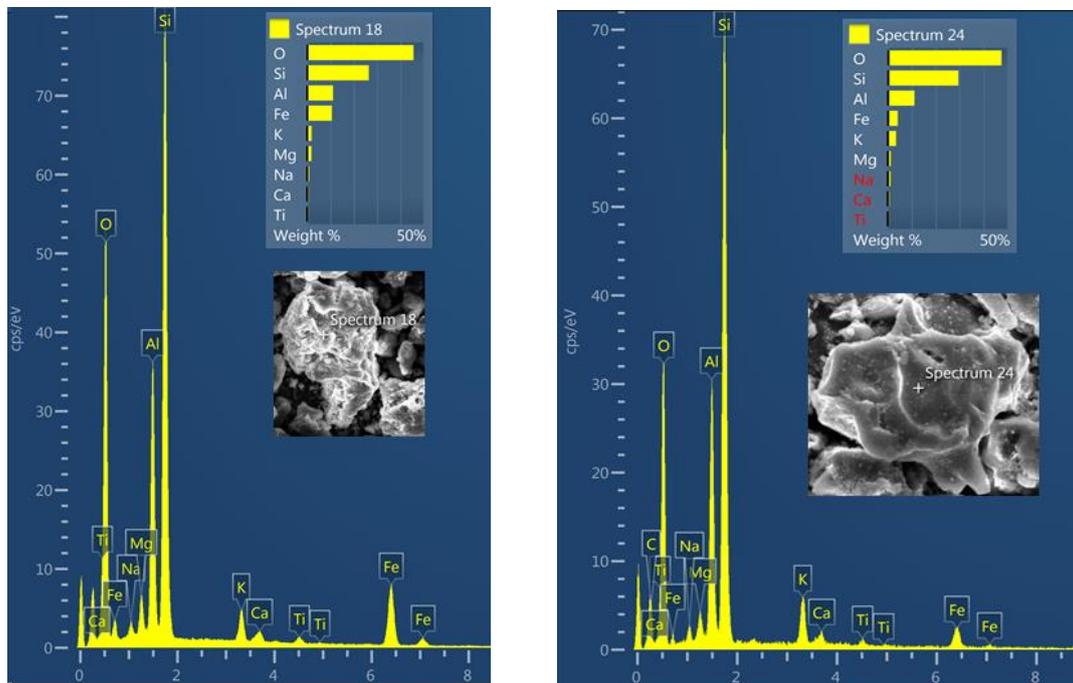


Figura 57: Composición elemental de una muestra de polvo de ladrillo determinada por EDS en 2 puntos diferentes. **Fuente:** Elaboración propia.

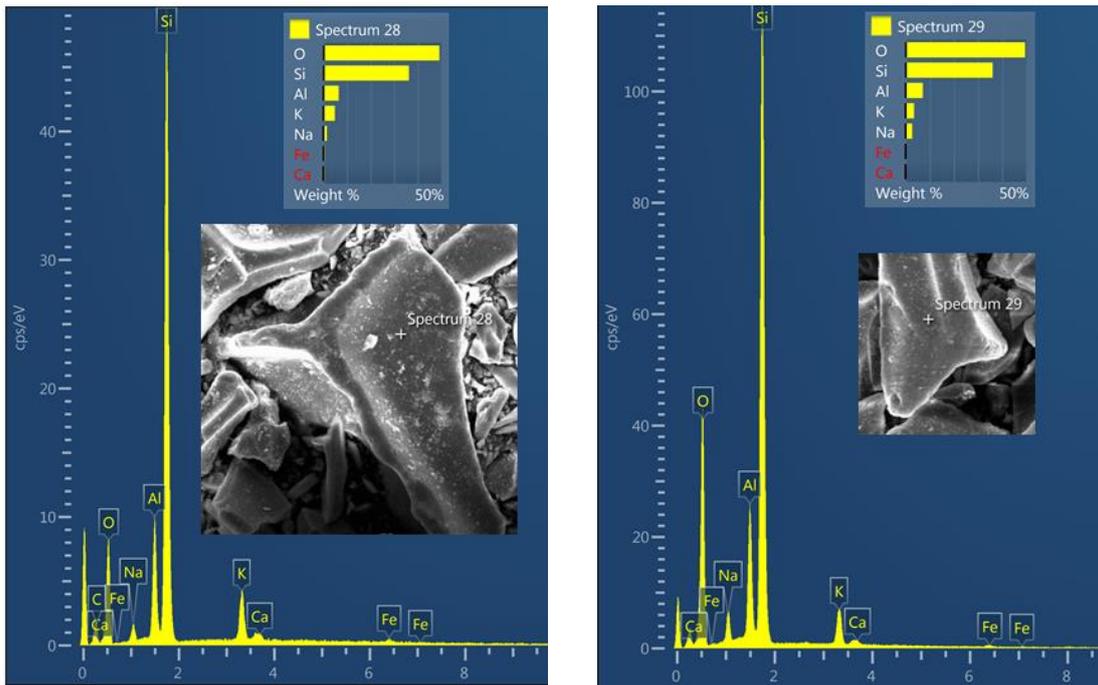


Figura 58: Composición elemental de una muestra de puzolana determinada por EDS en 2 puntos diferentes.
Fuente: Elaboración propia.

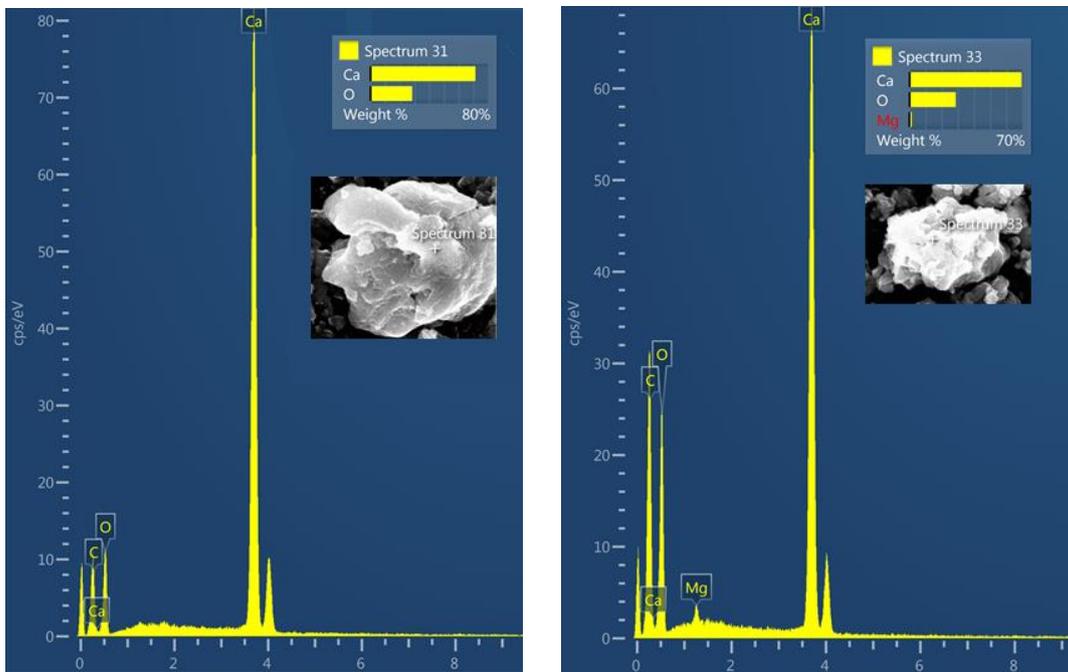


Figura 59: Composición elemental de una muestra de cal determinada por EDS en 2 puntos diferentes.
Fuente: Elaboración propia.

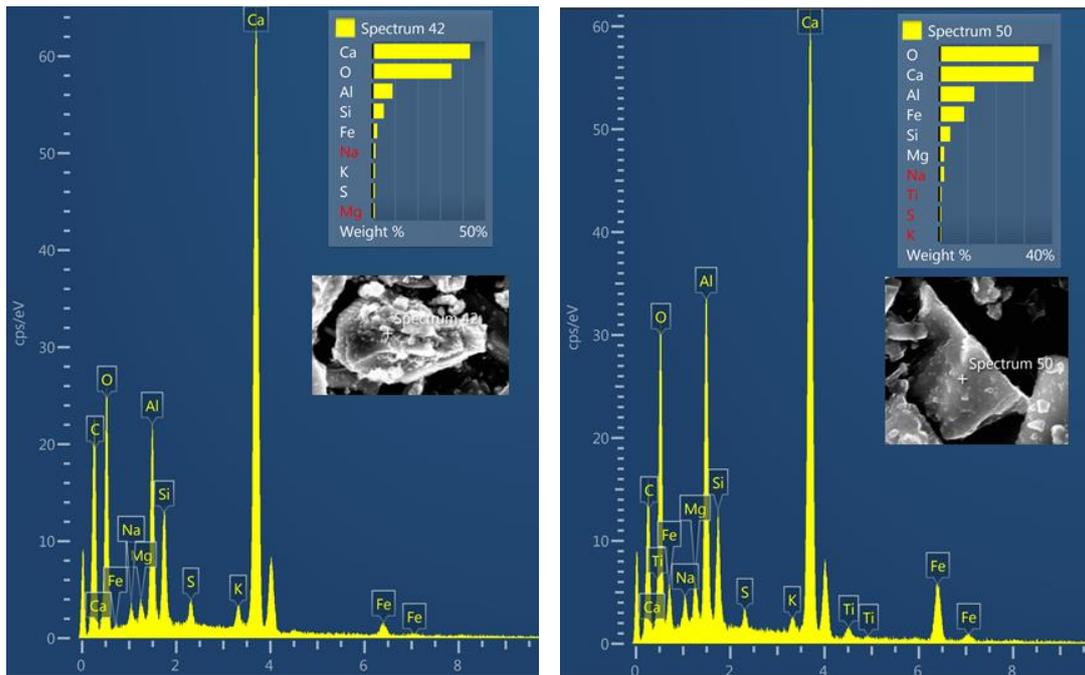


Figura 60: Composición elemental de una muestra de cemento Portland determinada por EDS en 2 puntos diferentes. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.2.b.iv Superficie específica y porosidad

En la Tabla 23 se exponen las características superficiales y de porosidad de la materia prima empleada, determinados por adsorción de N₂.

Tabla 23: Área superficial y caracterización de los poros de la materia prima.

Fuente: Elaboración propia.

Propiedad		Tierra	Puzolana	P. ladrillo	Cal
Área superficial	(m ² /g)	15.154	2.198	6.856	6.884
Volumen de poros	(cm ³ /g)	0.026	0.002	0.009	0.013
Tamaño de poros	(Å)	101.60	48.10	56.80	68.90

IV.2.c Determinación de la capacidad puzolánica

IV.2.c.i Método químico

La capacidad puzolánica de las adiciones minerales y la tierra, contrastadas con la de un patrón de comparación de elevada capacidad puzolánica (metacaolín) pueden observarse en la Figura 61.

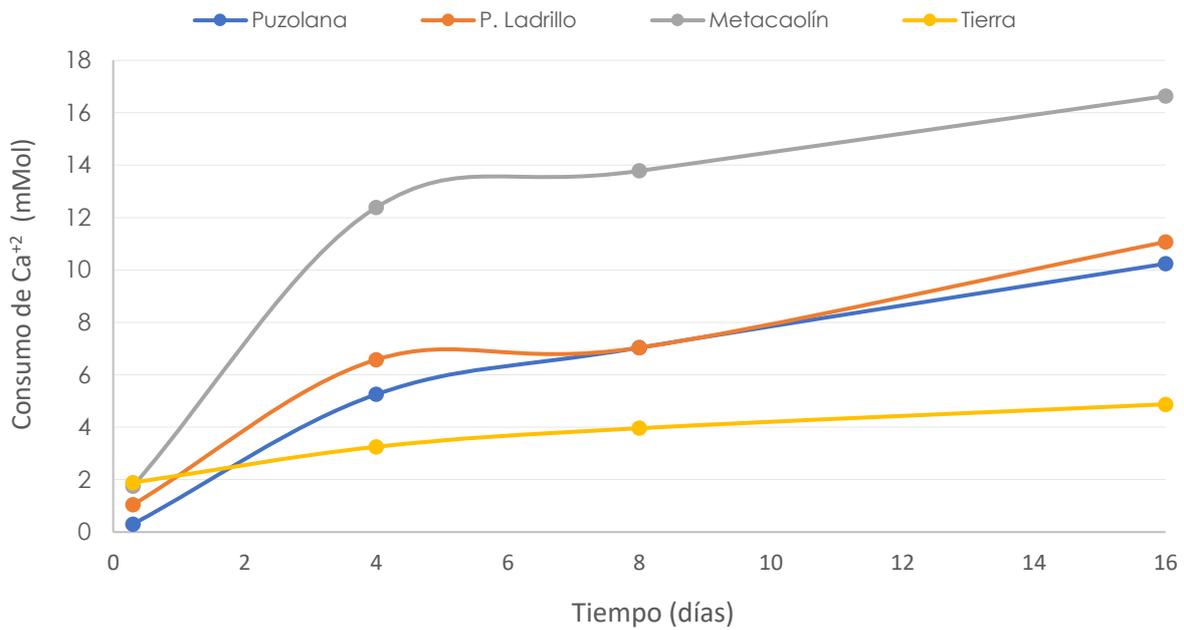


Figura 61: Consumo de calcio de las diferentes adiciones minerales. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.2.c.ii Método Físico

En la Figura 62 y la Figura 63 puede apreciarse el procedimiento empleado para determinar el índice de fluidez de los morteros de cal con reemplazos parciales de adiciones minerales y su resistencia a compresión. En la Tabla 24 se muestra la resistencia individual de cada una de las probetas ensayadas mientras que, en la Figura 64 se expresa la resistencia a compresión media de las diferentes series de morteros de cal moldeadas con distintos porcentajes de reemplazo de polvo de ladrillo y puzolana.

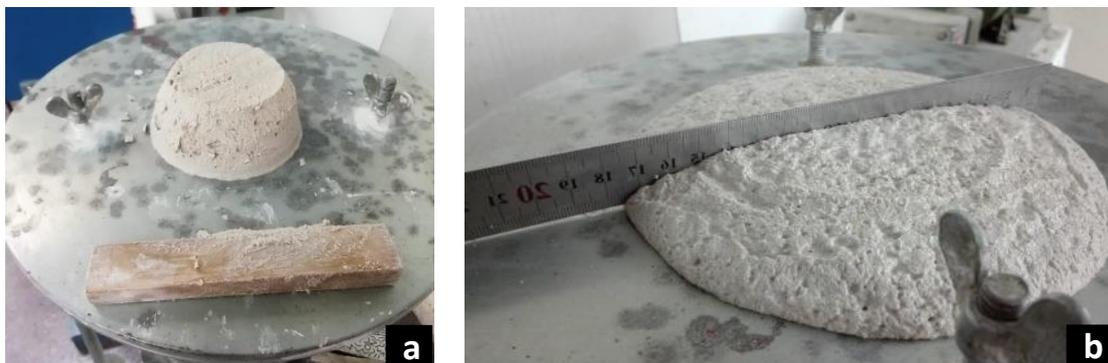


Figura 62: Determinación de la fluidez de los morteros de cal con **a)** 10% de reemplazo de puzolana y **b)** 10% de puzolana. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 63: Realización del ensayo de resistencia a compresión sobre una probeta de la serie P-30.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24: Resistencia a compresión de los morteros de cal con diferentes porcentajes de reemplazo de adiciones minerales. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie: % de reemplazo de cal	ID	Carga de rotura (Kgf)	Resistencia (Kgf/cm ²)		
			Individual	Promedio	Desviación
10% polvo de ladrillo	1	107.1	2.19	1.97	0.49
	2	107.1	2.19		
	3	61.2	1.25		
	4	111.69	2.28		
30% polvo de ladrillo	1	206.55	4.22	3.93	0.87
	2	145.35	2.97		
	3	174.42	3.56		
	4	244.8	5.00		
50% polvo de ladrillo	1	81.09	1.65	3.47	1.36
	2	169.83	3.47		
	3	241.74	4.93		
	4	186.66	3.81		
10% puzolana	1	91.8	1.87	2.03	0.53
	2	107.1	2.19		

	3	68.85	1.41		
	4	130.05	2.65		
30% puzolana	1	137.7	2.81	3.47	1.35
	2	153	3.12		
	3	267.75	5.46		
	4	122.4	2.50		
50% puzolana	1	321.3	6.56	6.85	0.75
	2	290.7	5.93		
	3	364.14	7.43		
	4	367.2	7.49		
Solo cal	1	82.62	1.69	2.04	0.60
	2	84.15	1.72		
	3	143.82	2.94		
	4	88.74	1.81		

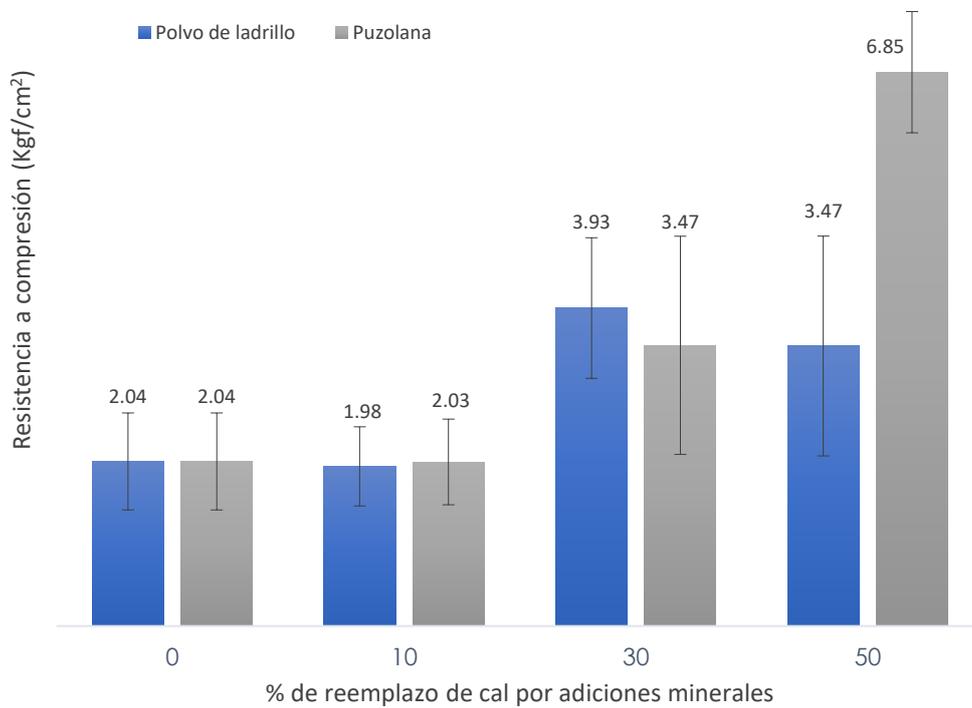


Figura 64: Resistencia a compresión de los morteros de cal con diferentes porcentajes de reemplazo de cal por adiciones minerales. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.3 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS PROBETAS

IV.3.a Microscopía electrónica de barrido (FESEM)

Entre la Figura 65 y la Figura 76 se expone la morfología superficial y microestructura de las diferentes series de probetas confeccionadas, con 5 hs de curado húmedo y a los 28 días de haberse producido (habiendo permanecido los primeros 7 días en cámara de curado).

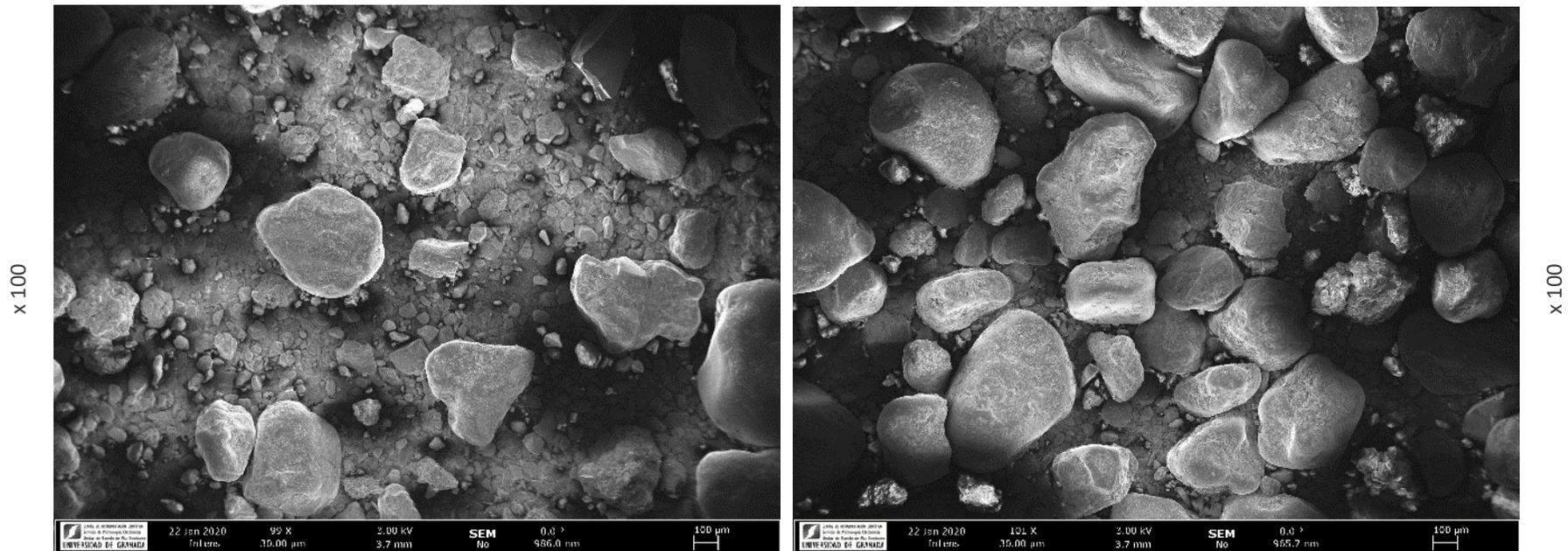


Figura 65: imágenes FESEM de las series de control sin estabilizantes: serie I (izquierda) y serie II (derecha) luego de 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

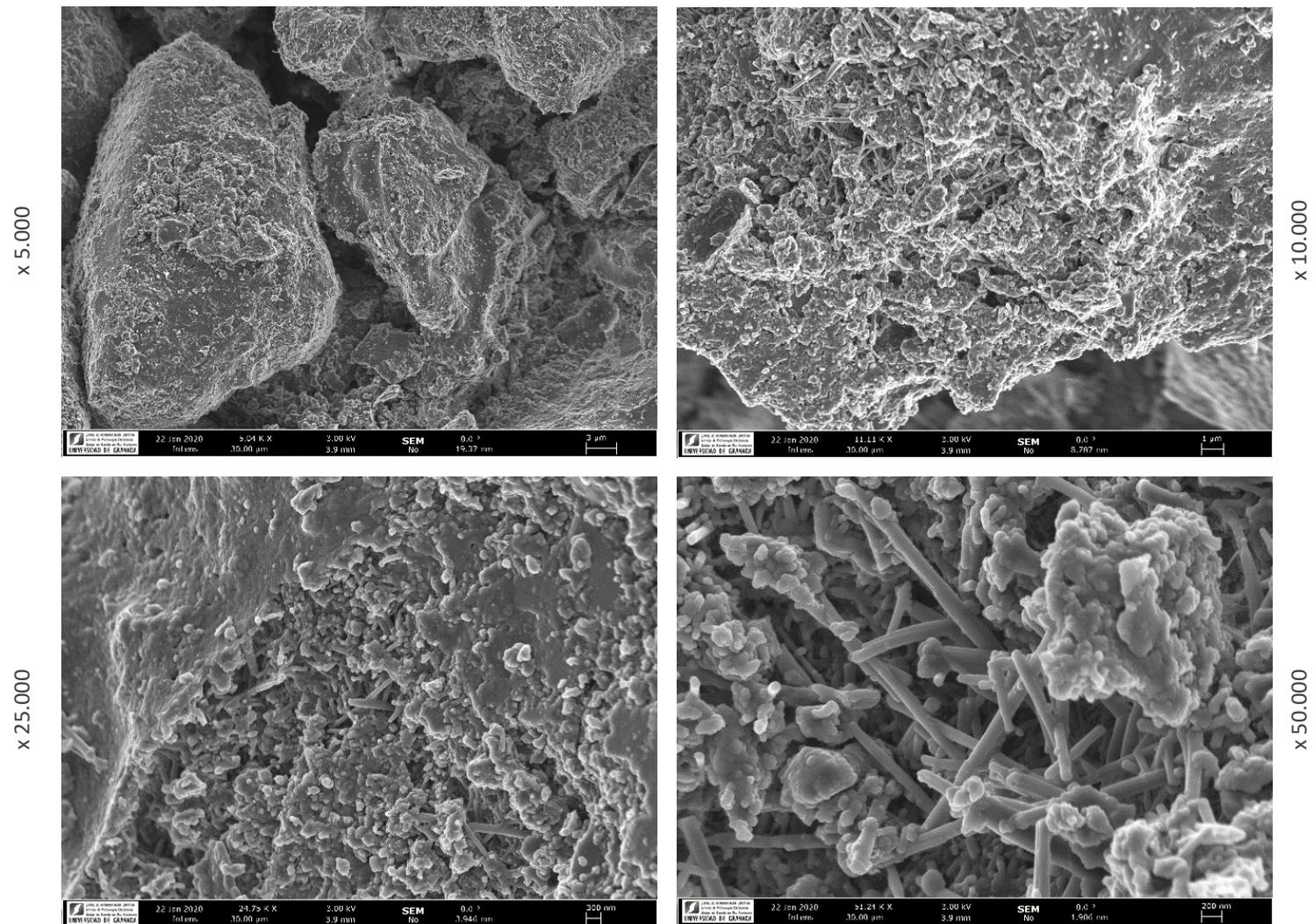


Figura 66: imágenes FESEM de la serie de control estabilizada con cemento Portland (serie III) luego de 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

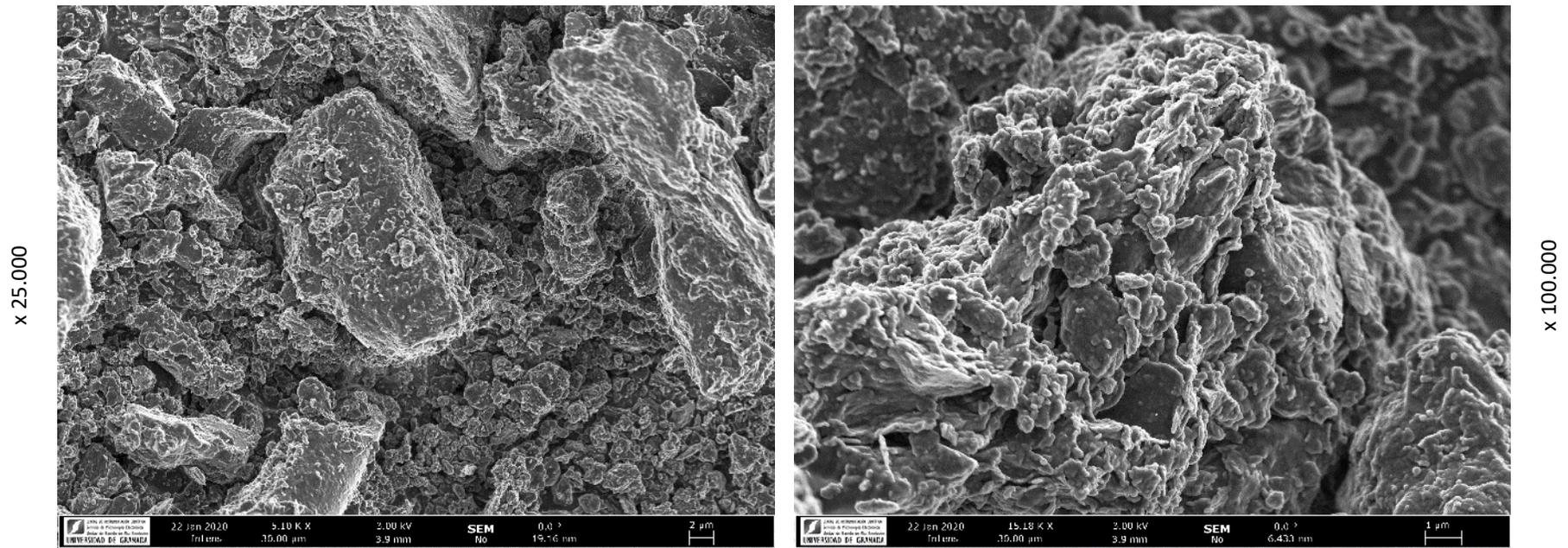


Figura 67: imágenes FESEM de la serie de control estabilizada con cal (serie IV) luego de 5 hs.

Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

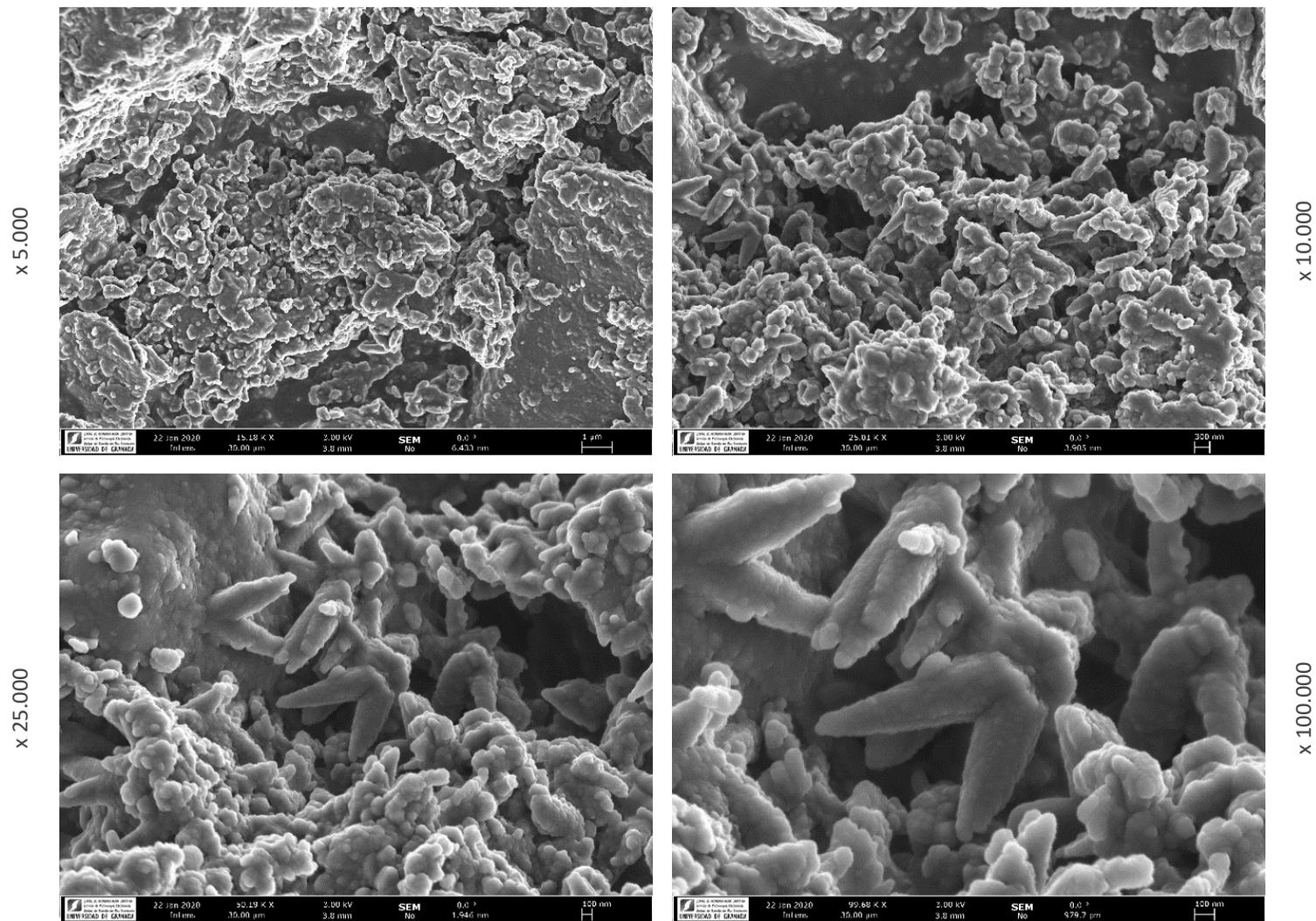


Figura 68: imágenes FESEM de la serie de control estabilizada con cal (serie IV) luego de 28 días. **Fuente:** Elaboración propia

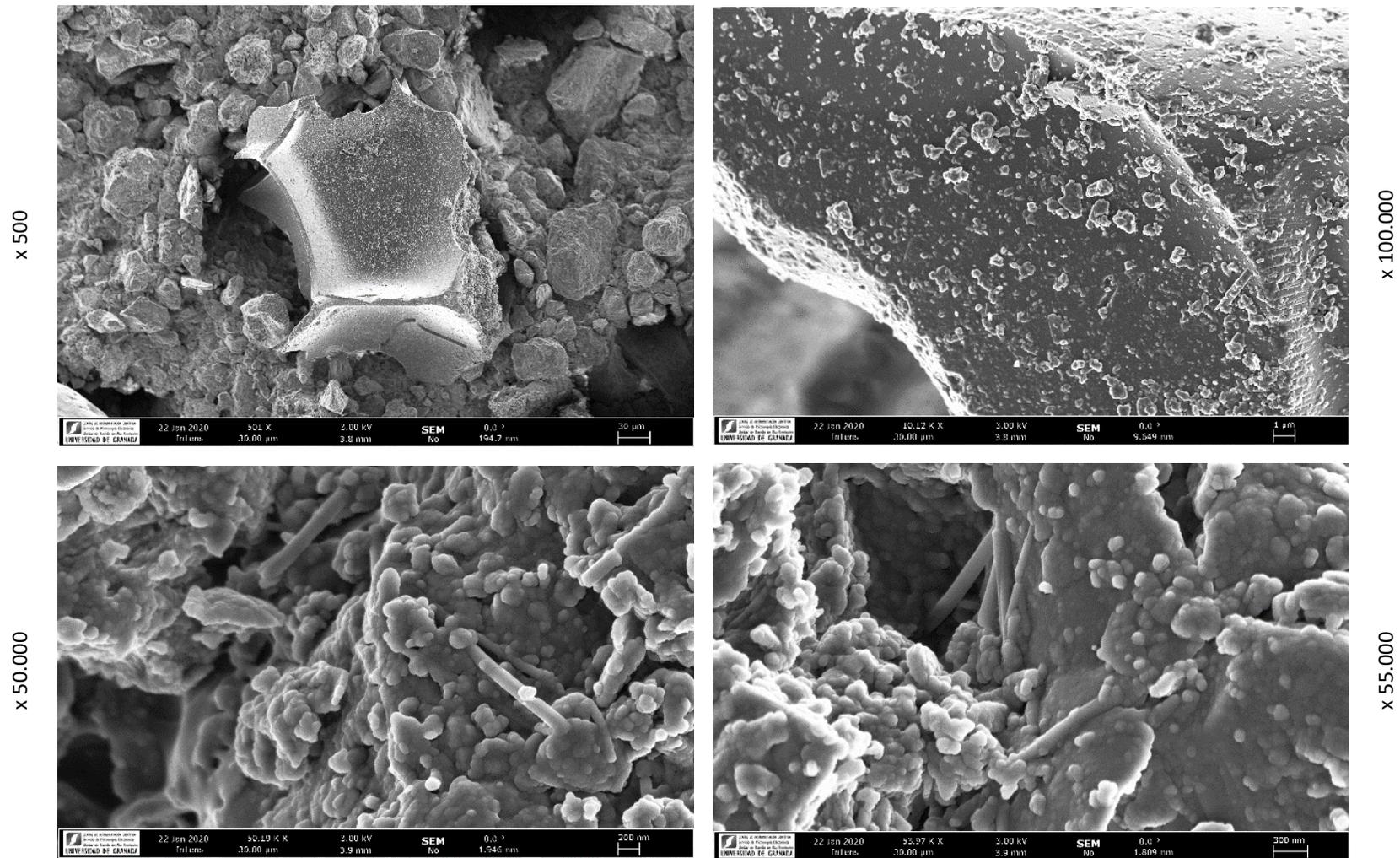


Figura 69: imágenes FESEM de la serie con 3% de puzolana y 7% de cal (serie V) luego de 5 hs.
Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

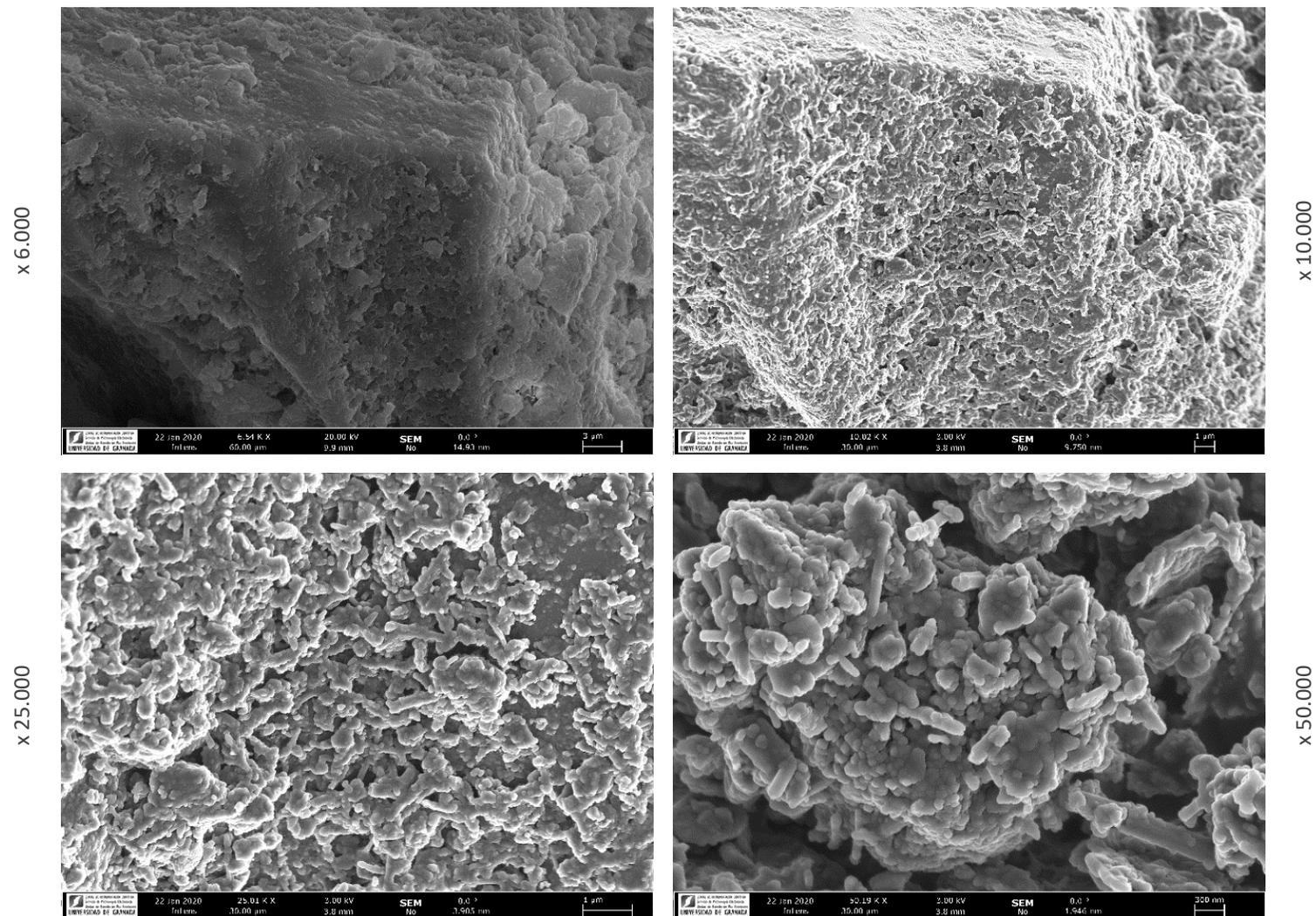


Figura 70: imágenes FESEM de la serie con 3% de puzolana y 7% de cal (serie V) luego de 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

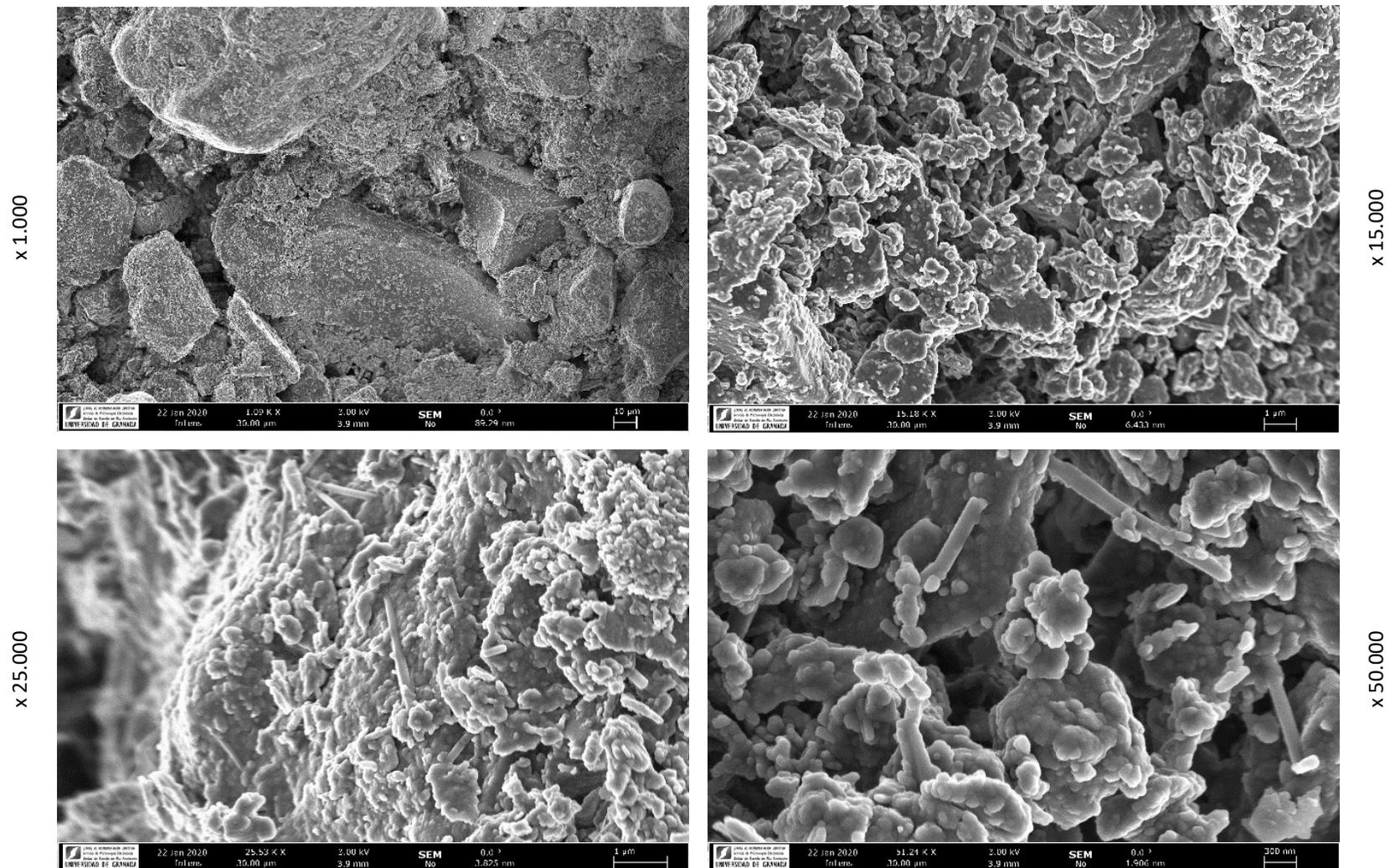


Figura 71: imágenes FESEM de la serie con 5% de puzolana y 5% de cal (serie VI) luego de 5 hs.

Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

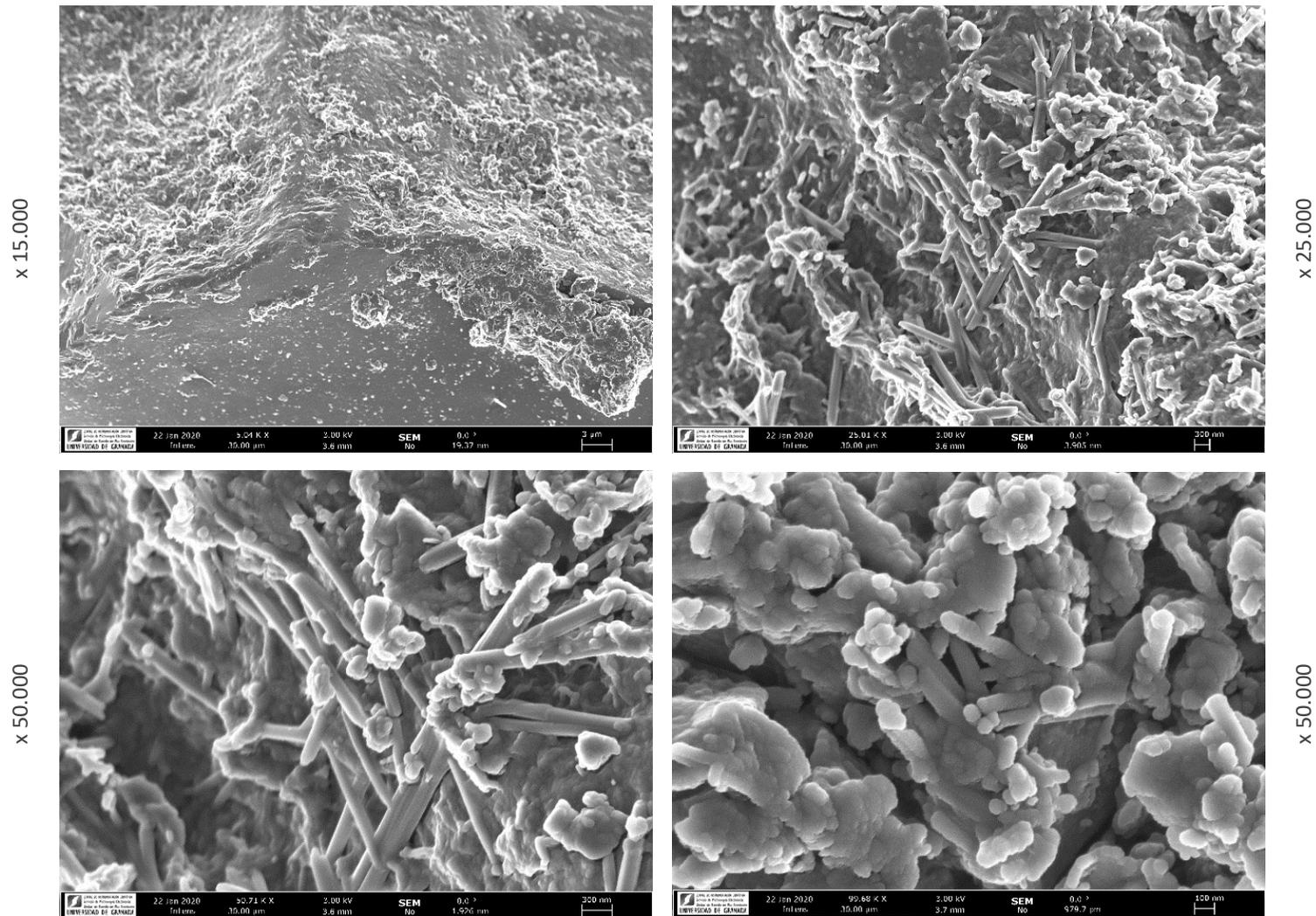


Figura 72: imágenes FESEM de la serie con 5% de puzolana y 5% de cal (serie VI) luego de 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

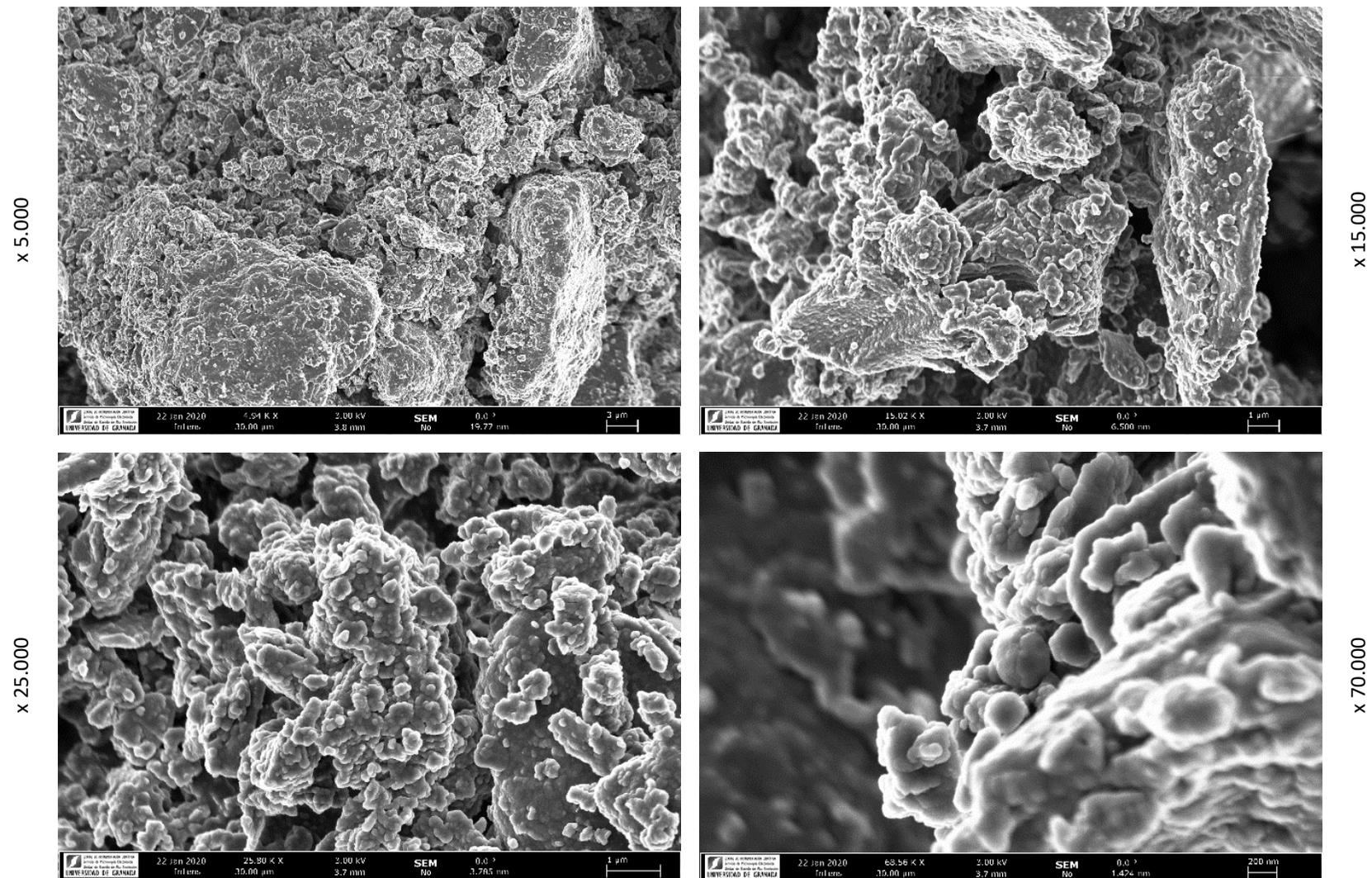


Figura 73: imágenes FESEM de la serie con 3% de polvo de ladrillo y 7% de cal (serie VII) luego de 5 hs.

Fuente: Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

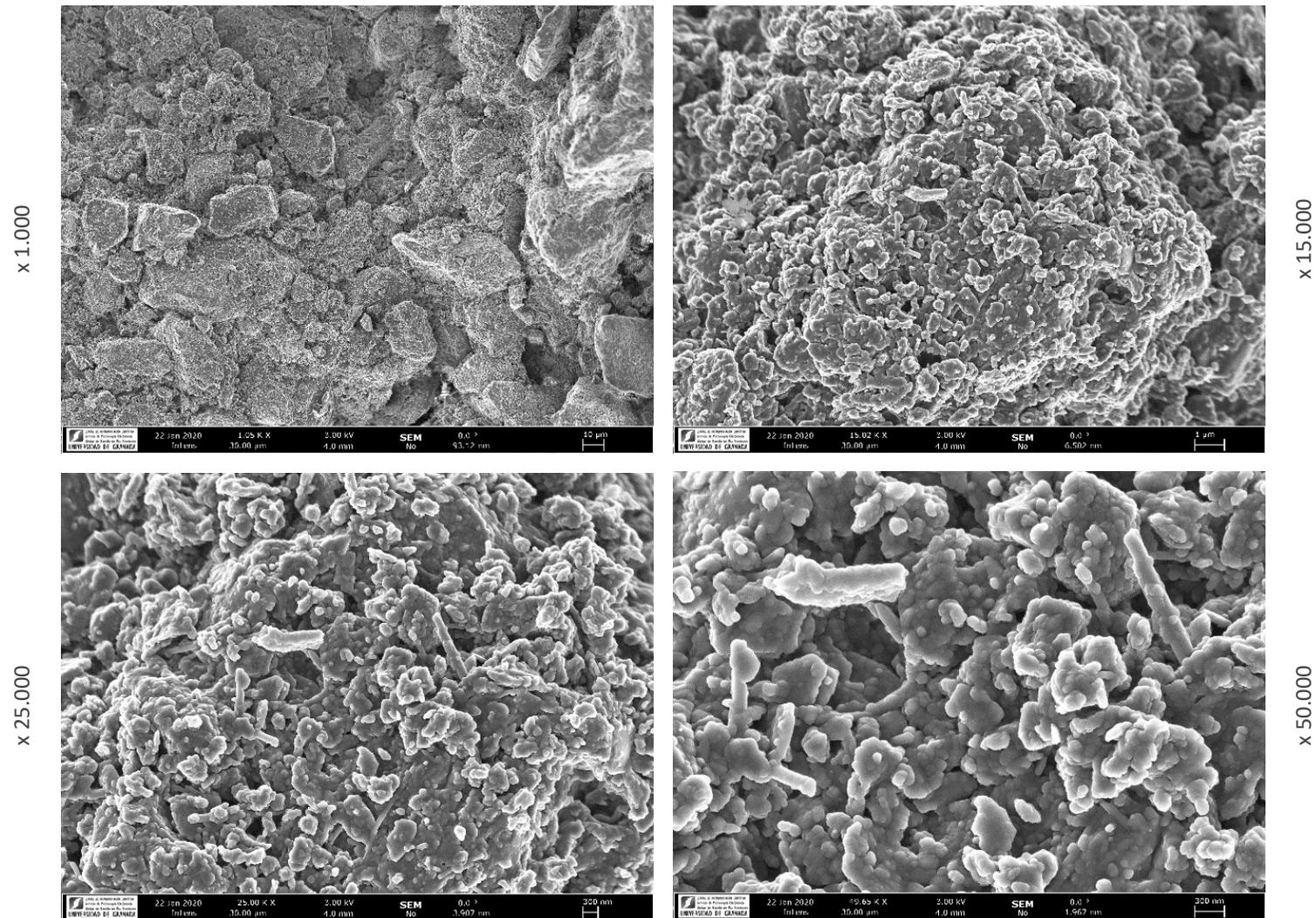


Figura 74: imágenes FESEM de la serie con 3% de polvo de ladrillo y 7% de cal (serie VII) luego de 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

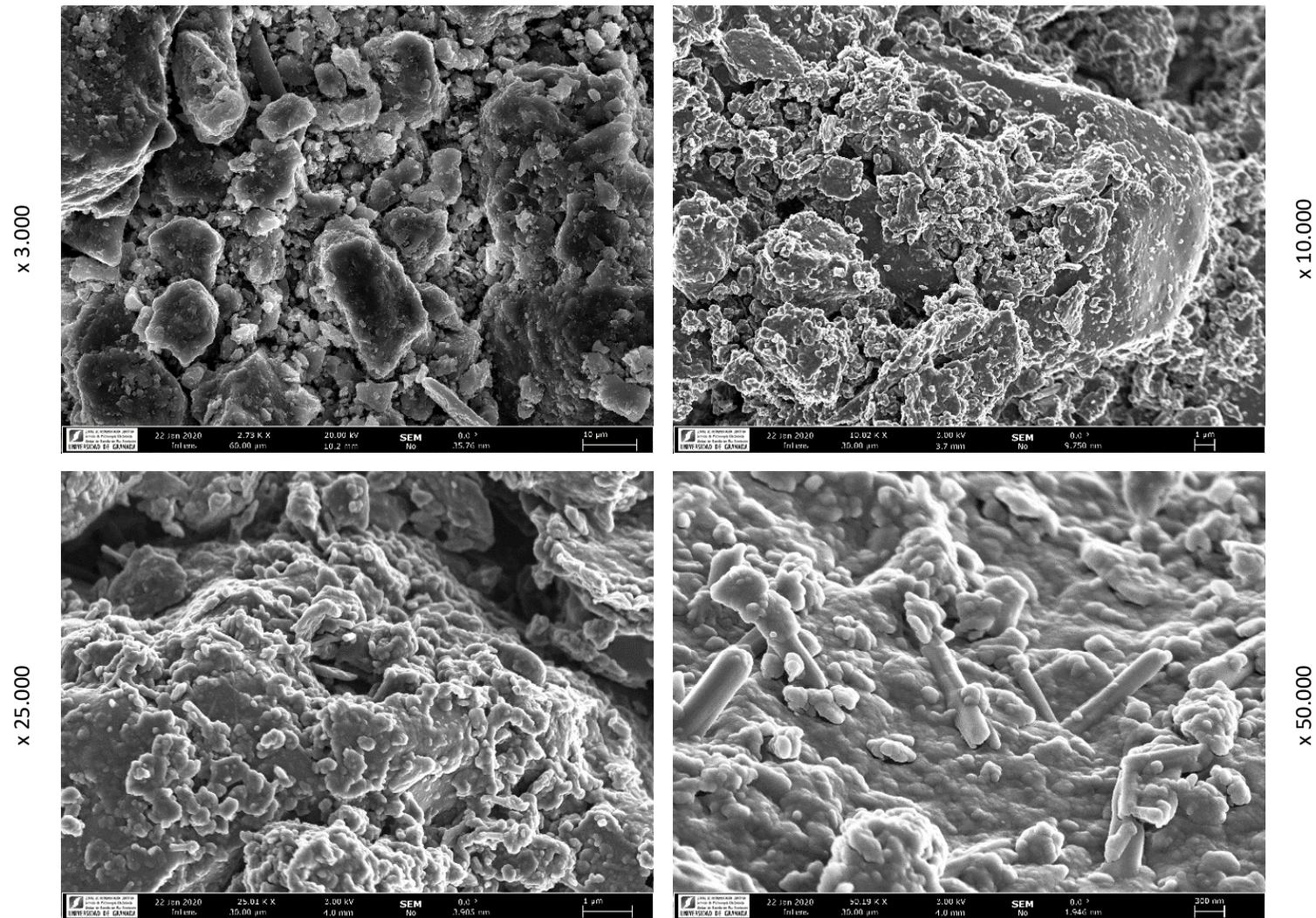


Figura 75: imágenes FESEM de la serie con 5% de polvo de ladrillo y 5% de cal (serie VIII) luego de 5 hs.

Fuente: Elaboración propia.

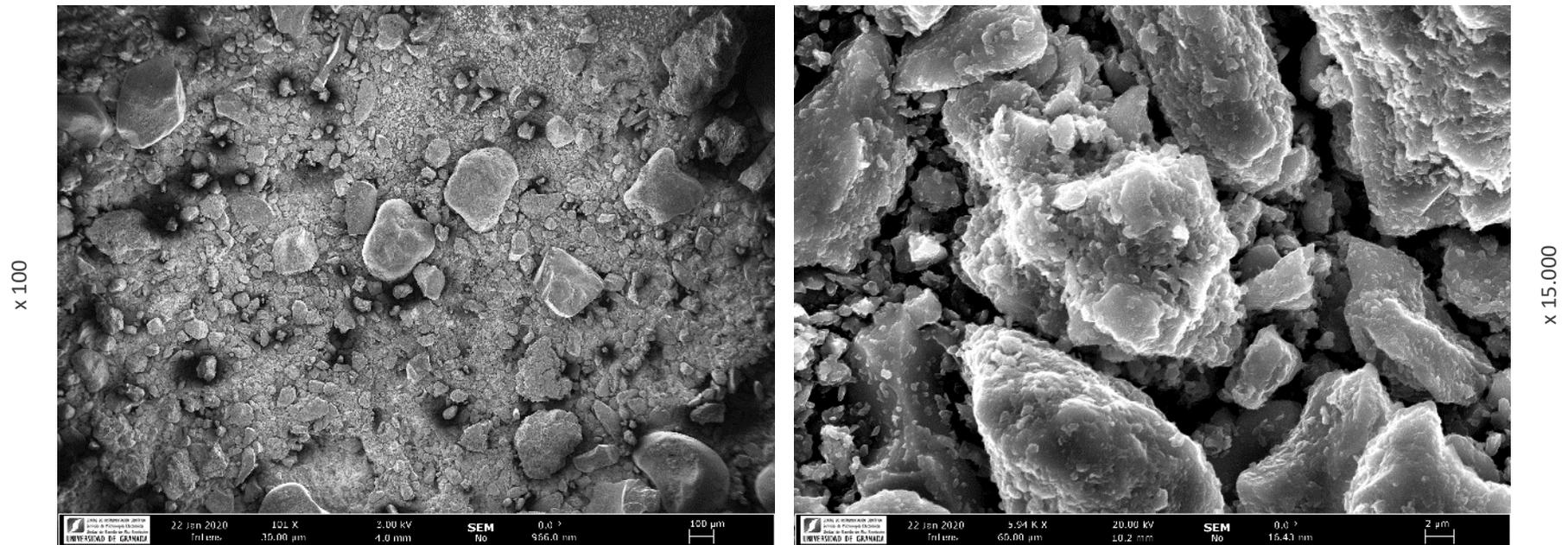


Figura 76: imágenes FESEM de la serie con 5% de polvo de ladrillo y 5% de cal (serie VIII) luego de 28 días.
Fuente: Elaboración propia.

IV.3.b Difracción de rayos X (DRX)

En la Tabla 25 se presenta un resumen de los diferentes grupos minerales detectados por DRX en cada una de las series de probetas. Asimismo, entre la Figura 77 y la Figura 82 se exponen los difractogramas correspondientes.

Tabla 25: Minerales detectados por DRX en las diferentes series confeccionadas.

Fuente: Elaboración propia.

Serie	Minerales identificados							
	Ab	Mc	Illt	Qz	Fsp	SCH	Cal	Por
Serie I	X	X	X	X	X	-	-	-
Serie II	X	X	X	X	X			
Serie III	X	X	X	X	X	X		
Serie IV	X	X	X	X	X		X	
Serie V	X	X	X	X	X		X	X
Serie VI	X	X	X	X	X		X	
Serie VII	X	X	X	X	X		X	X
Serie VIII	X	X	X	X	X		X	X

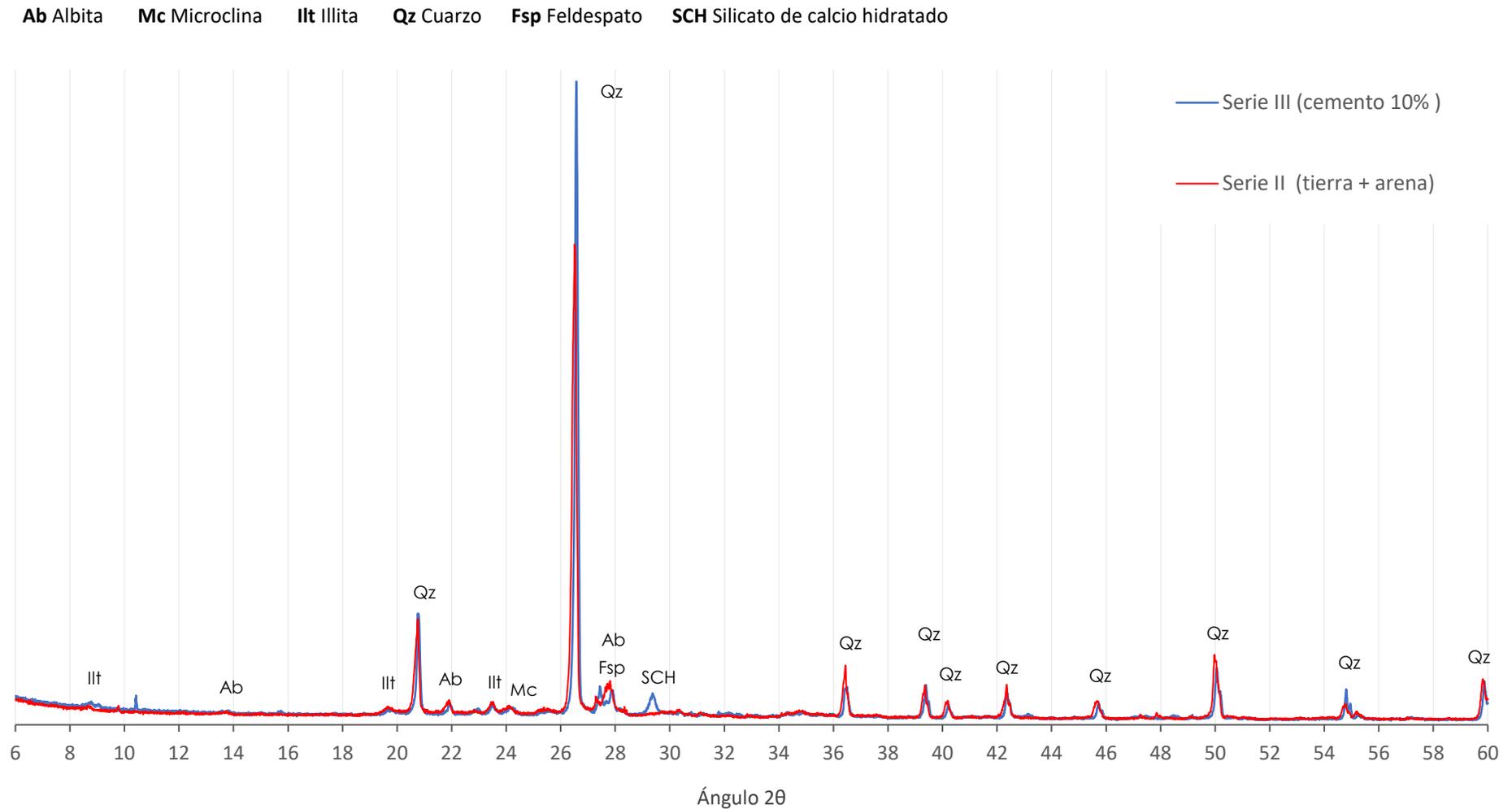


Figura 77: Difractogramas de muestras de polvo desorientado de las series de control I (sin estabilizantes) y serie la de control III (con 10% de cemento).

Fuente: Elaboración propia.

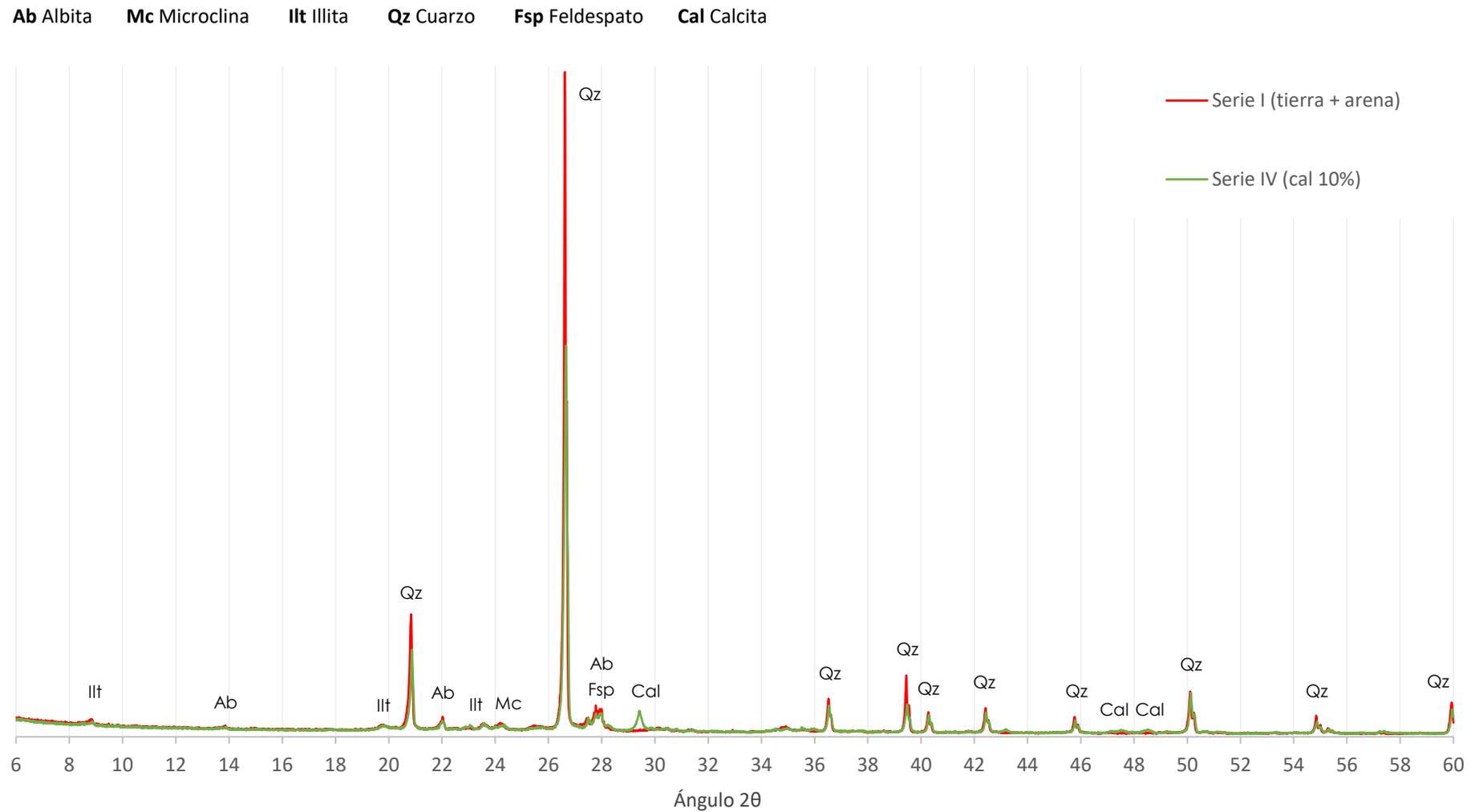


Figura 78: Difractogramas de muestras de polvo desorientado de las series de control II (sin estabilizantes) y serie la de control IV (con 10% de cal).

Fuente: Elaboración propia.

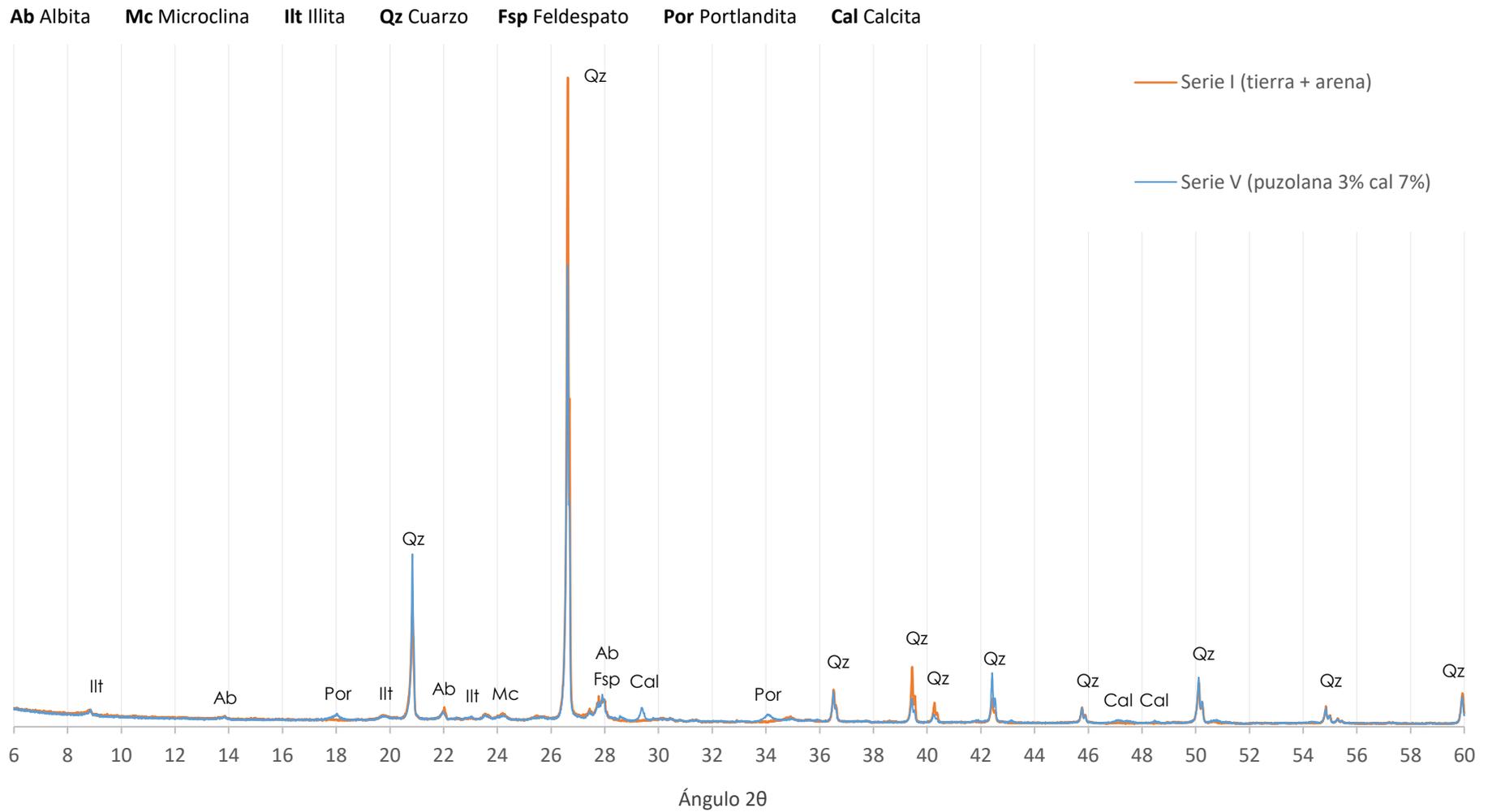


Figura 79: Difractogramas de muestras de polvo desorientado de la serie de control II (sin estabilizantes) y la serie V (3% de puzolana y 7% de cal).

Fuente: Elaboración propia.

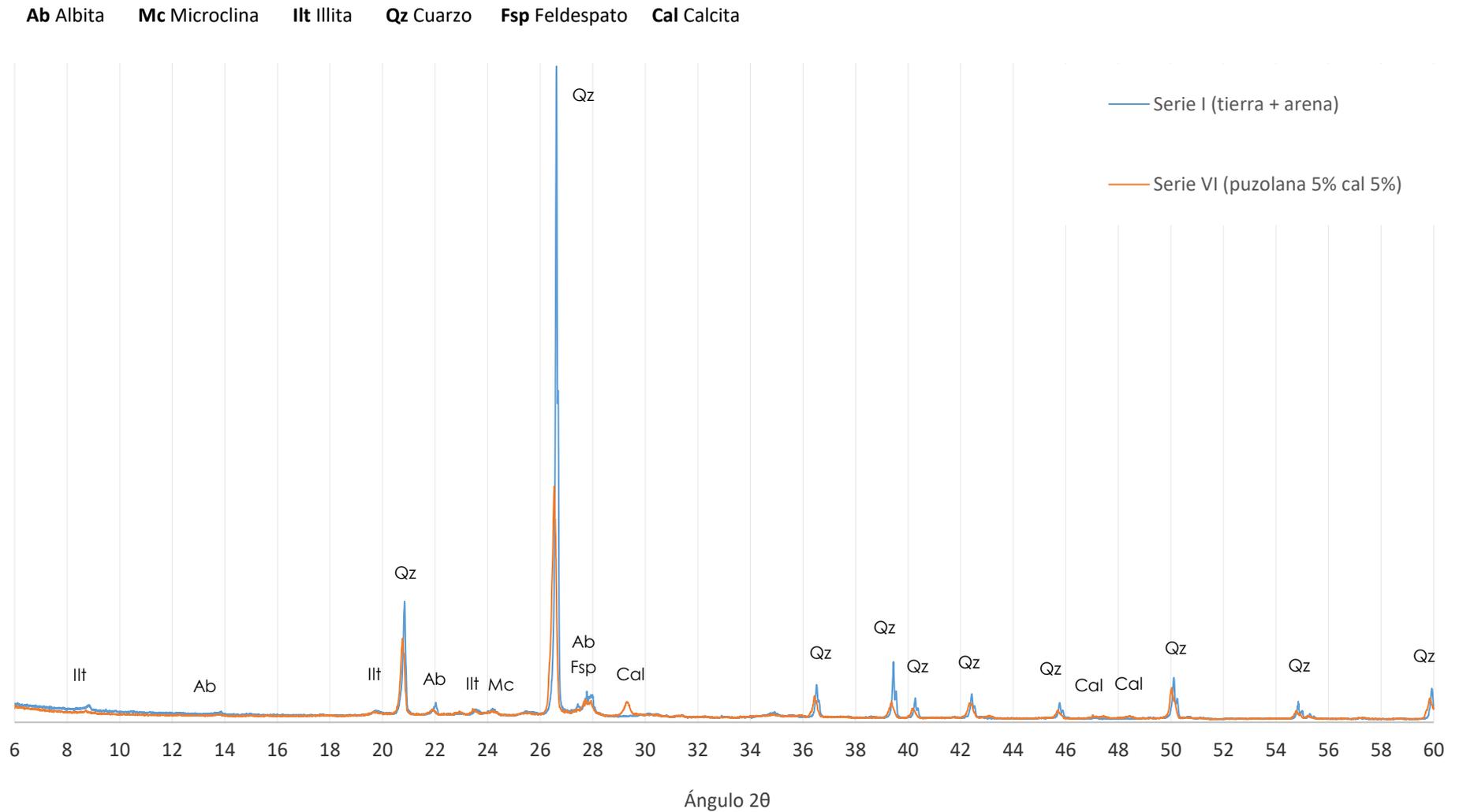


Figura 80: Difractogramas de muestras de polvo desorientado de la serie de control II (sin estabilizantes) y la serie VI (5% de puzolana y 5% de cal).

Fuente: Elaboración propia.

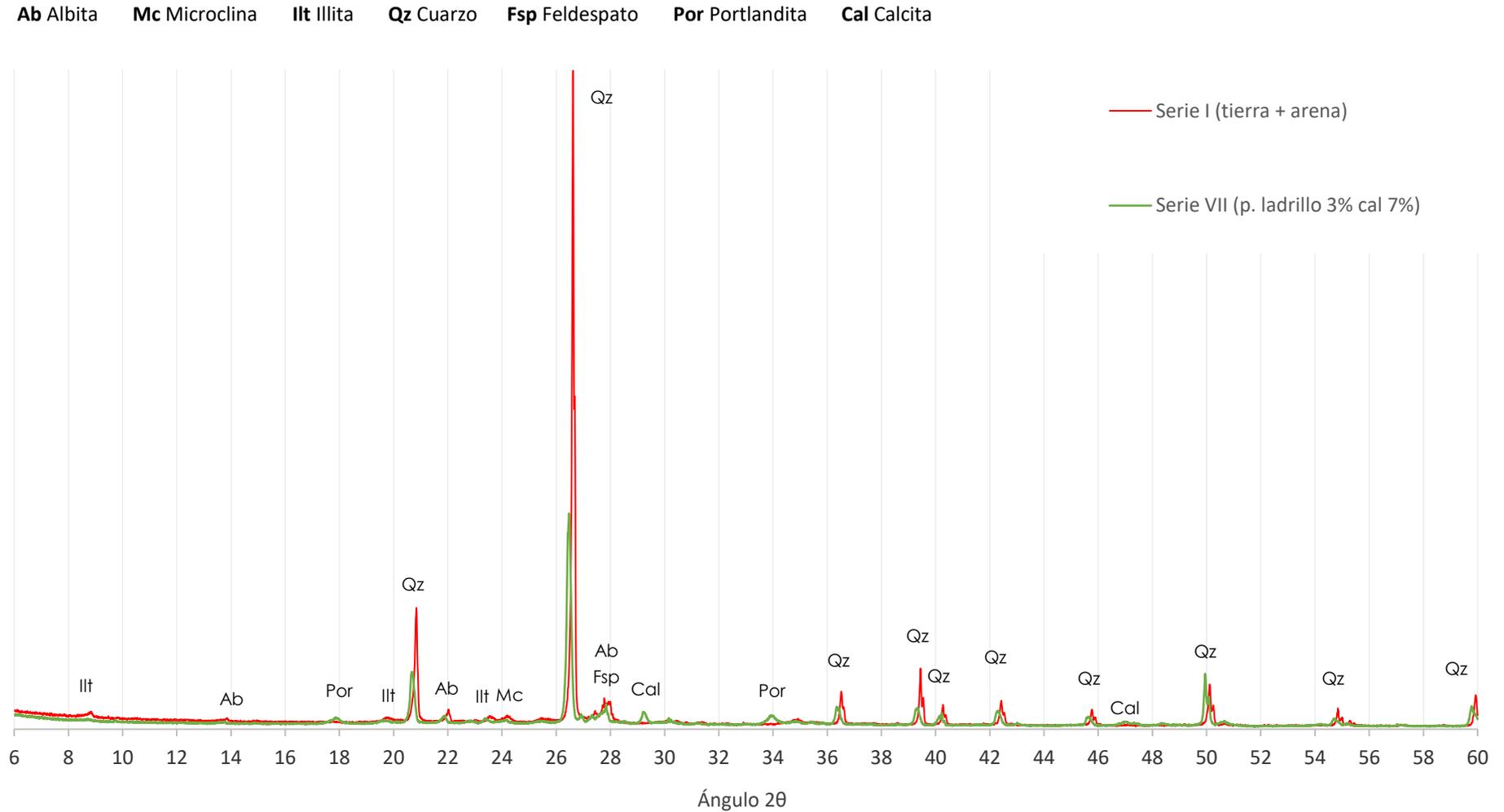


Figura 81: Difractogramas de muestras de polvo desorientado de la serie de control II (sin estabilizantes) y la serie VII (3% de polvo de ladrillo y 7% de cal).

Fuente: Elaboración propia.

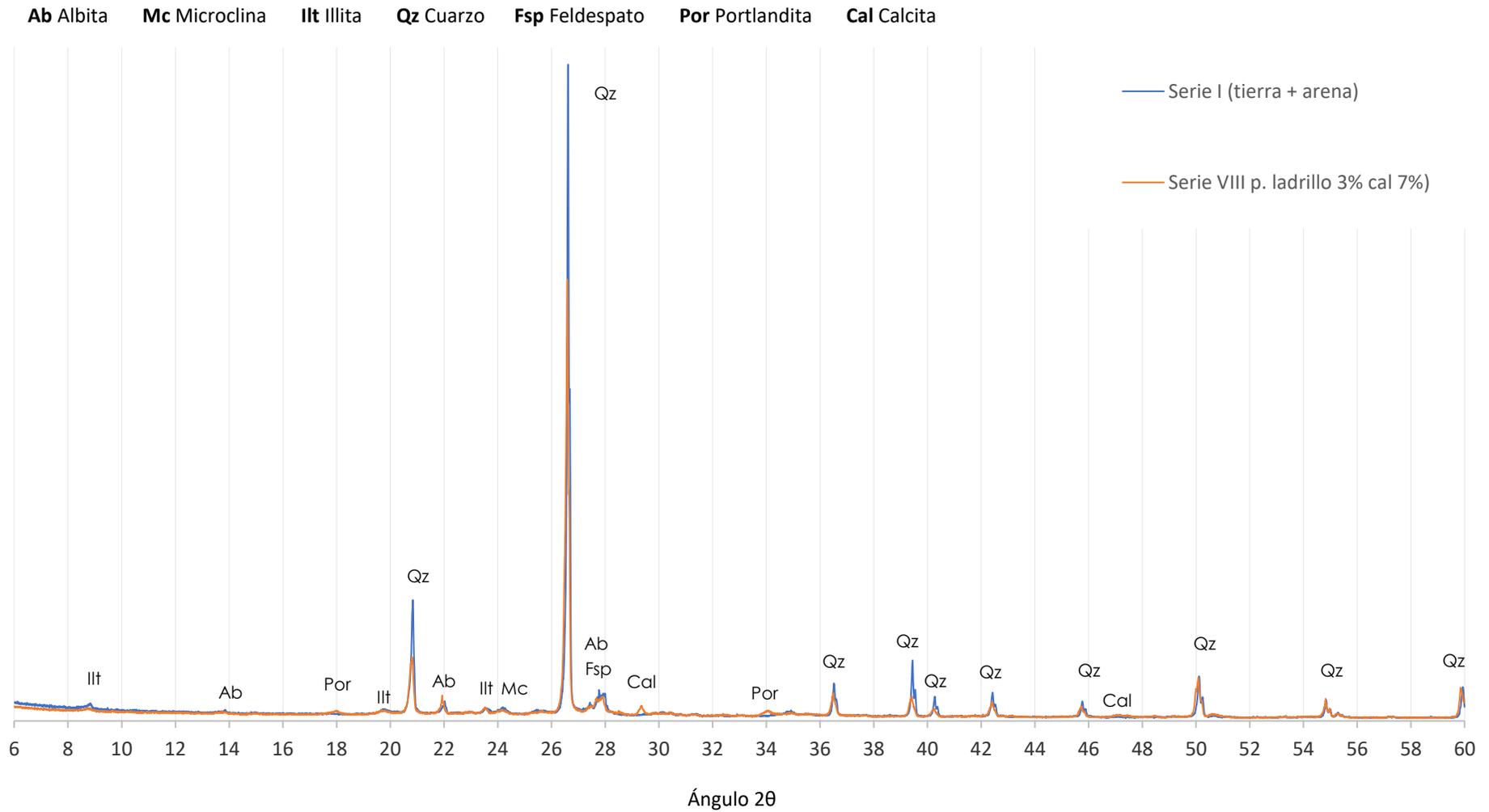


Figura 82: Difractogramas de muestras de polvo desorientado de la serie de control II (sin estabilizantes) y la serie VIII (5% de polvo de ladrillo y 5% de cal).
Fuente: Elaboración propia.

IV.3.c Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

Con intenciones de corroborar el desarrollo de las reacciones puzolánicas en las series de BTC estabilizados con Puzolana Natural y Polvo de Ladrillo se evaluaron por microscopia electrónica de transmisión muestras de las series III, V y VII. Entre la Figura 83 y la Figura 101 se expone la estructura cristalina (SAED) y composición elemental de las regiones resaltadas de diferentes muestras de la serie III, V y VII.

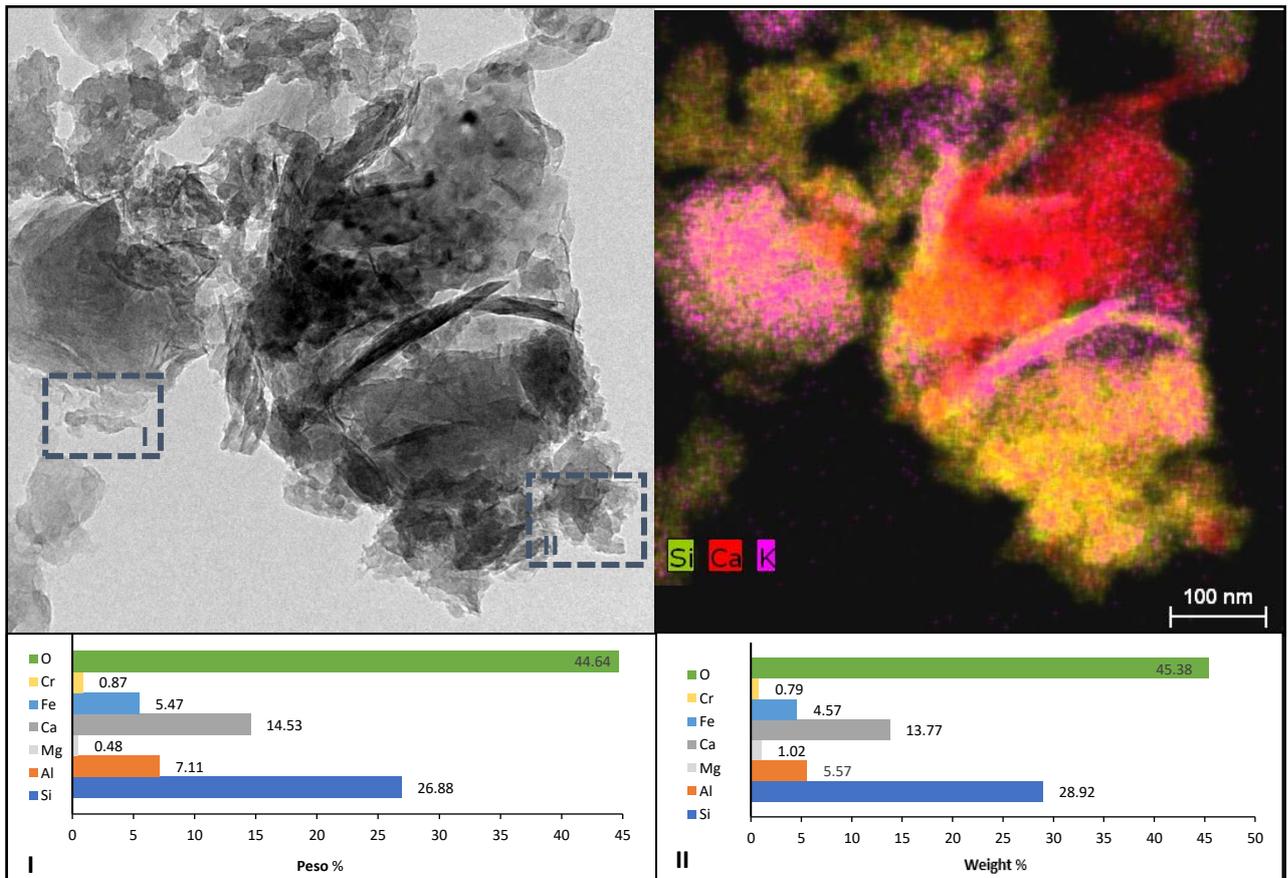


Figura 83: Imagen TEM, espectros EDX y mapa de elementos de una muestra de la serie VII (3% de polvo de ladrillo).

Fuente: Elaboración propia.

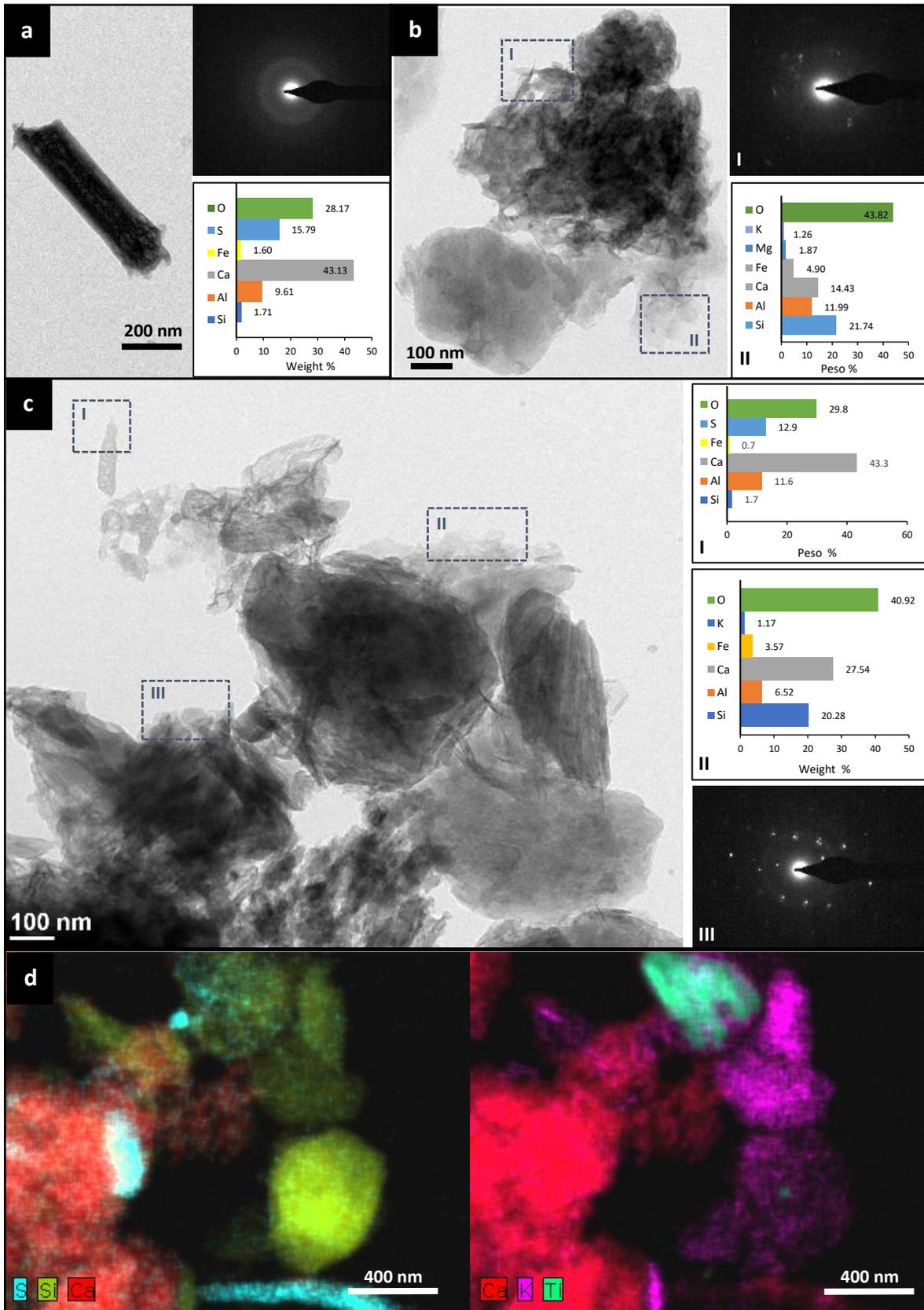


Figura 84: Imágenes TEM, espectros EDX y patrón de dispersión SAED de muestras de la serie V (3% de pozzolana) donde se aprecia **a)** un bastón aislado de etringita; **b)** la posible formación de C-(A)-S-H en los bordes externos de las partículas, **c)** la presencia de etringita (I), C-(A)-S-H (II) y minerales arcillosos (III) en una misma muestra y **d)** mapa de elementos. **Fuente:** Elaboración propia.

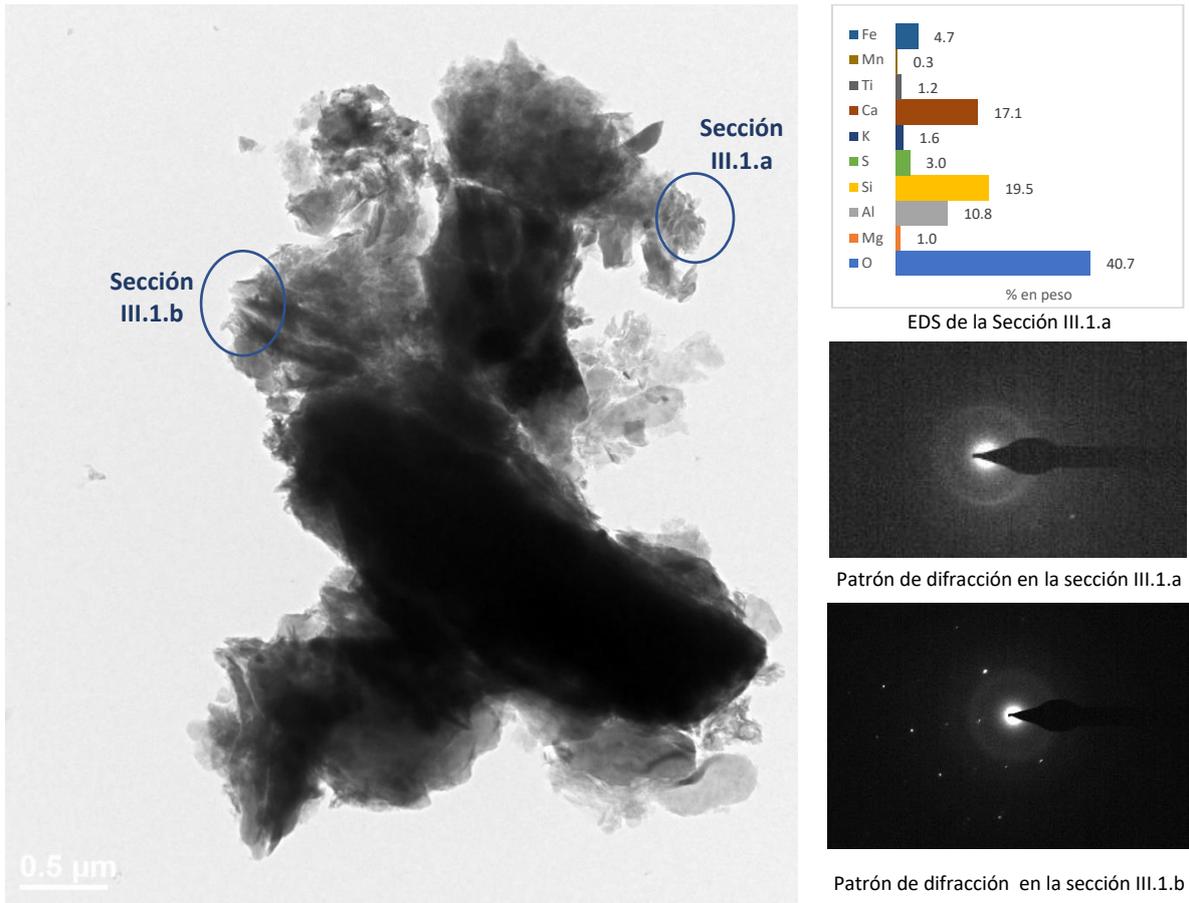


Figura 85: Imagen TEM, análisis EDS y patrón de difracción de electrones de la sección III.1 de una muestra de BTC de la serie III. **Fuente:** Elaboración propia.

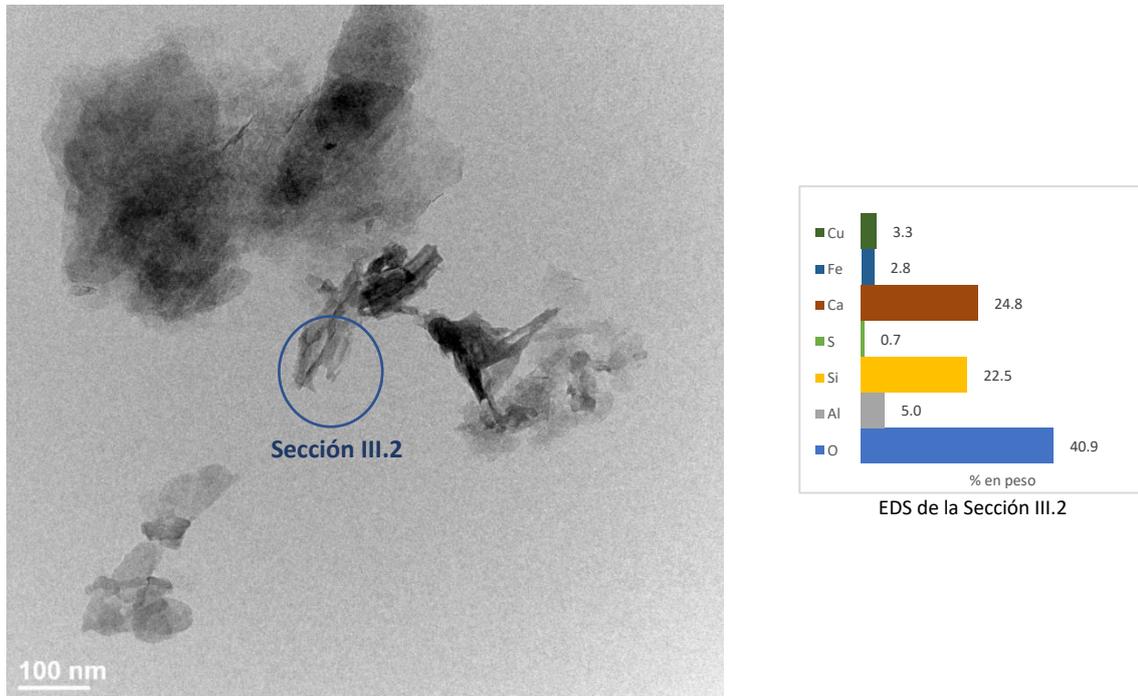


Figura 86: Imagen TEM y análisis EDS de la sección III.2 de una muestra de BTC de la serie III. **Fuente:** Elaboración propia.

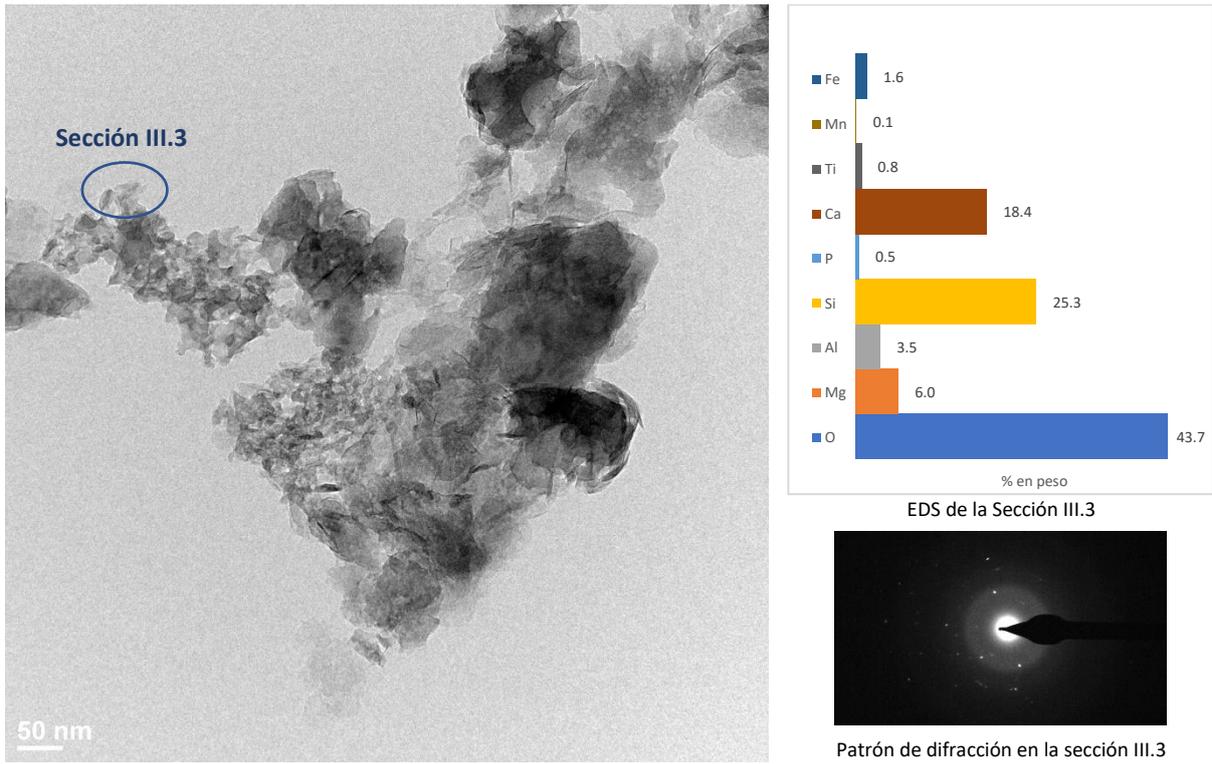


Figura 87: Imagen TEM y análisis EDS y patrón de difracción de electrones de la sección III.3 de una muestra de BTC de la serie III. **Fuente:** Elaboración propia.

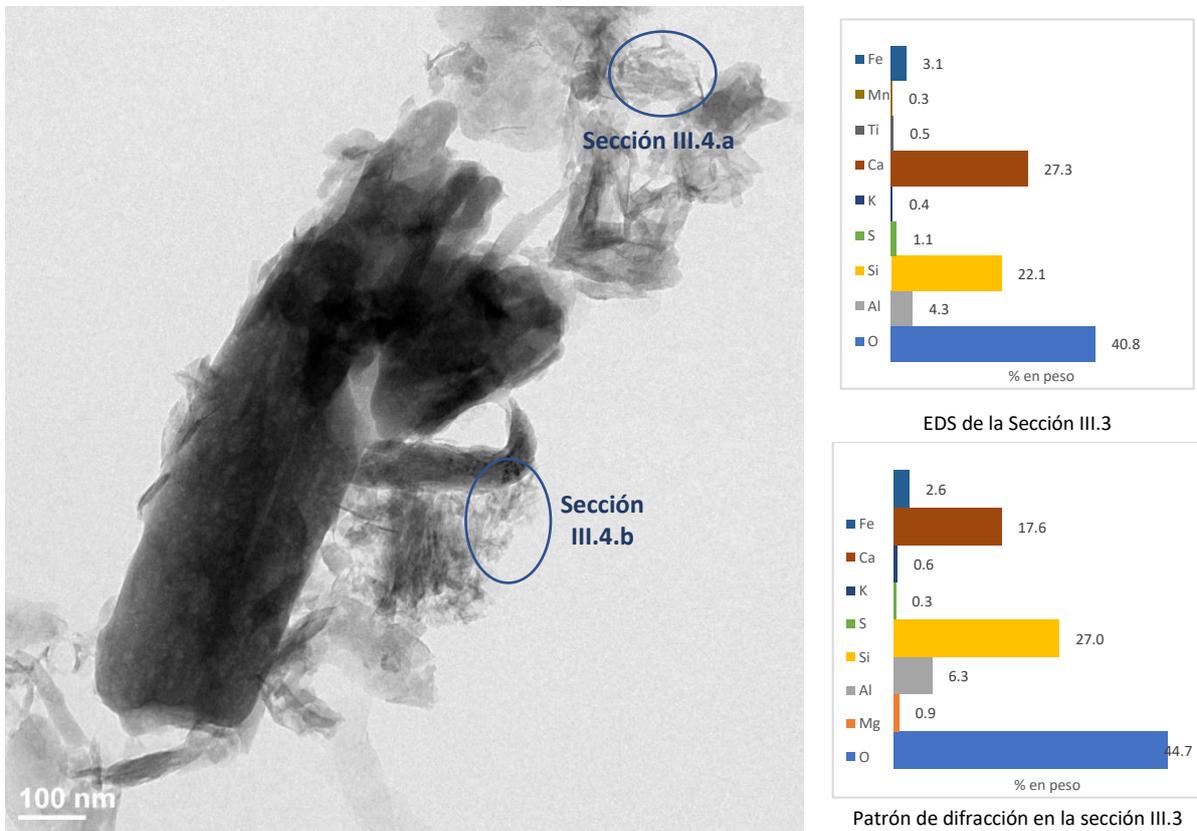


Figura 88: Imagen TEM y análisis EDS de la sección III.4 de una muestra de BTC de la serie III. **Fuente:** Elaboración propia.

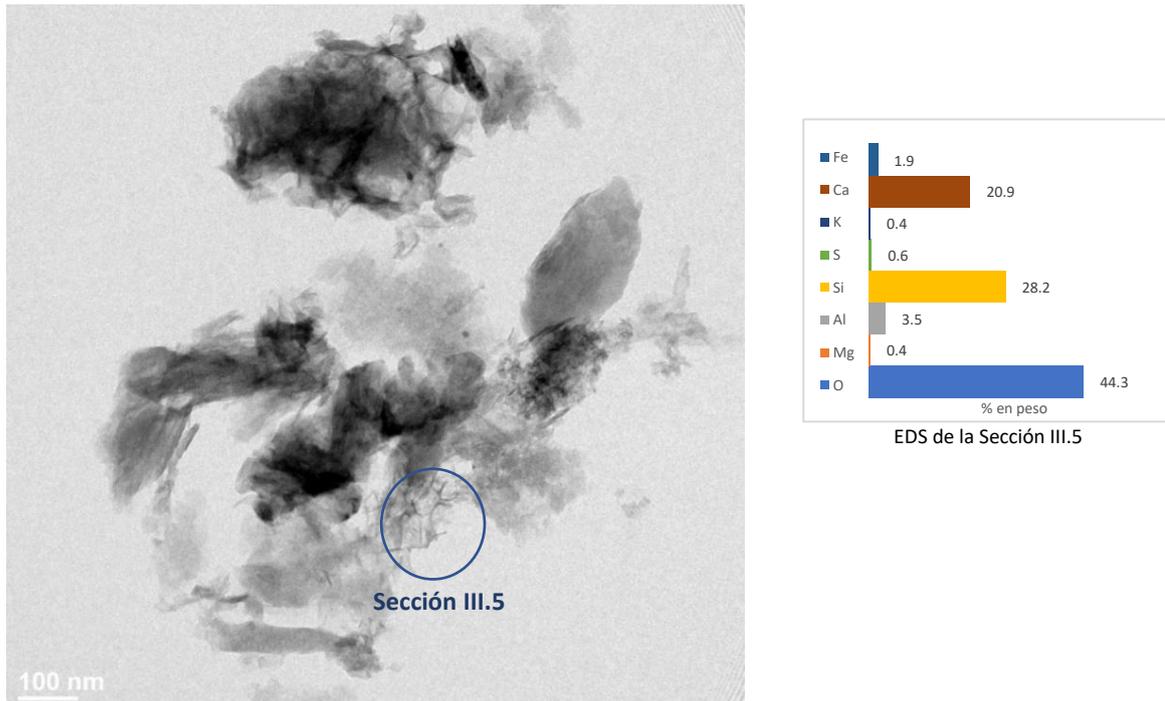


Figura 89: Imagen TEM y análisis EDS de la sección III.5 de una muestra de BTC de la serie III.
Fuente: Elaboración propia.

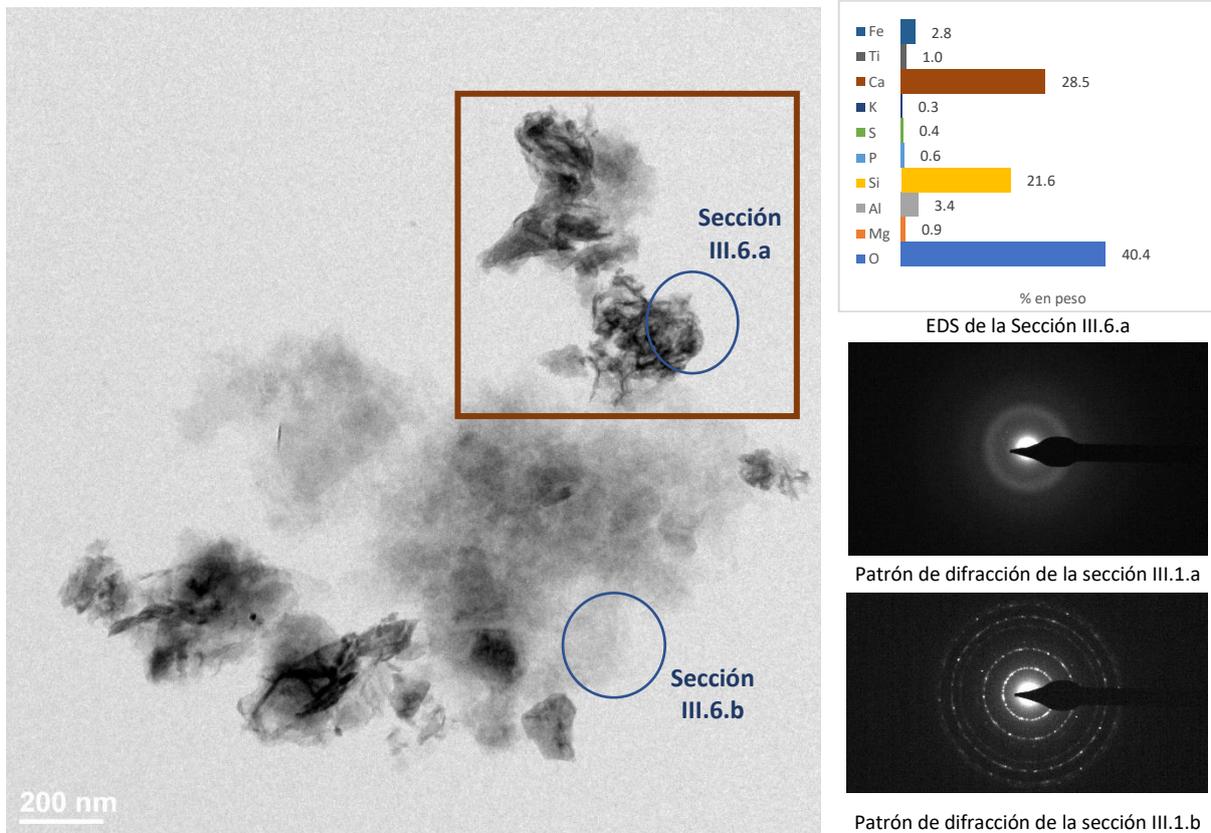


Figura 90: Imagen TEM, análisis EDS y patrón de difracción de electrones de la sección III.6 de una muestra de BTC de la serie III. **Fuente:** Elaboración propia.

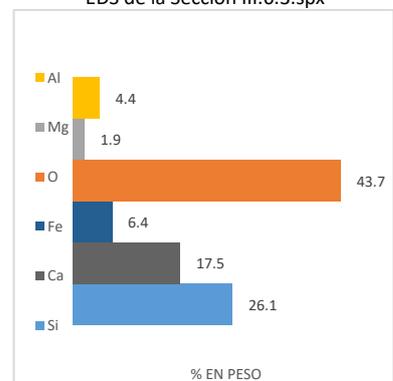
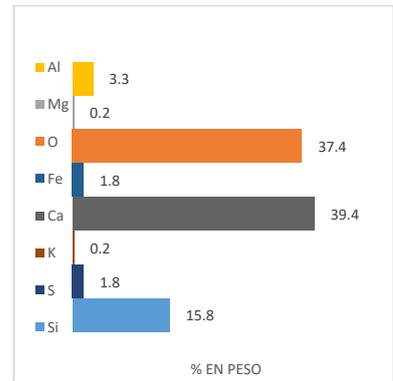
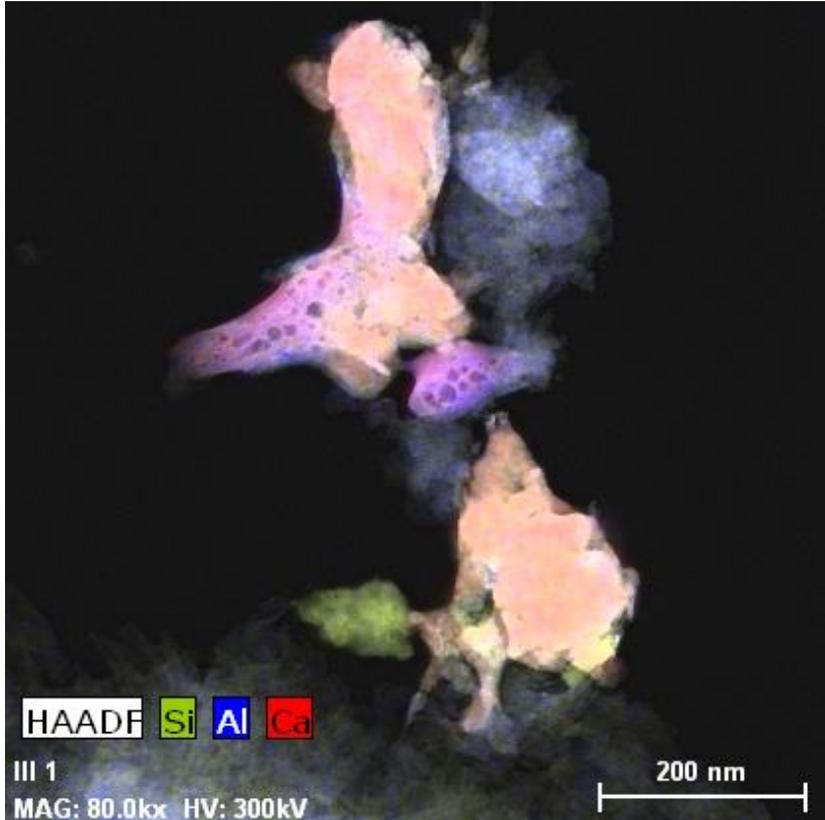
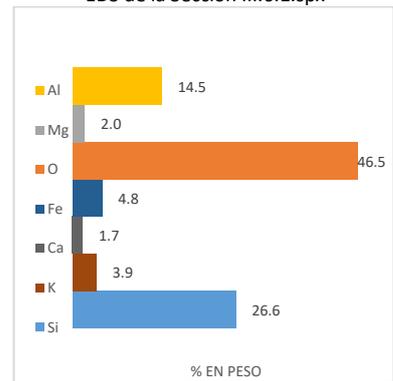
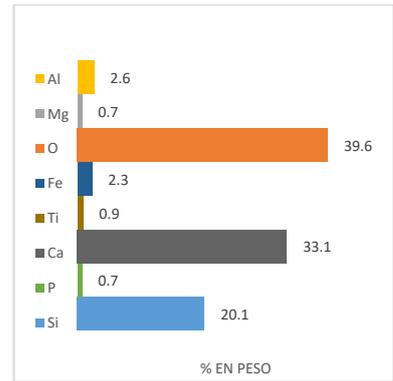
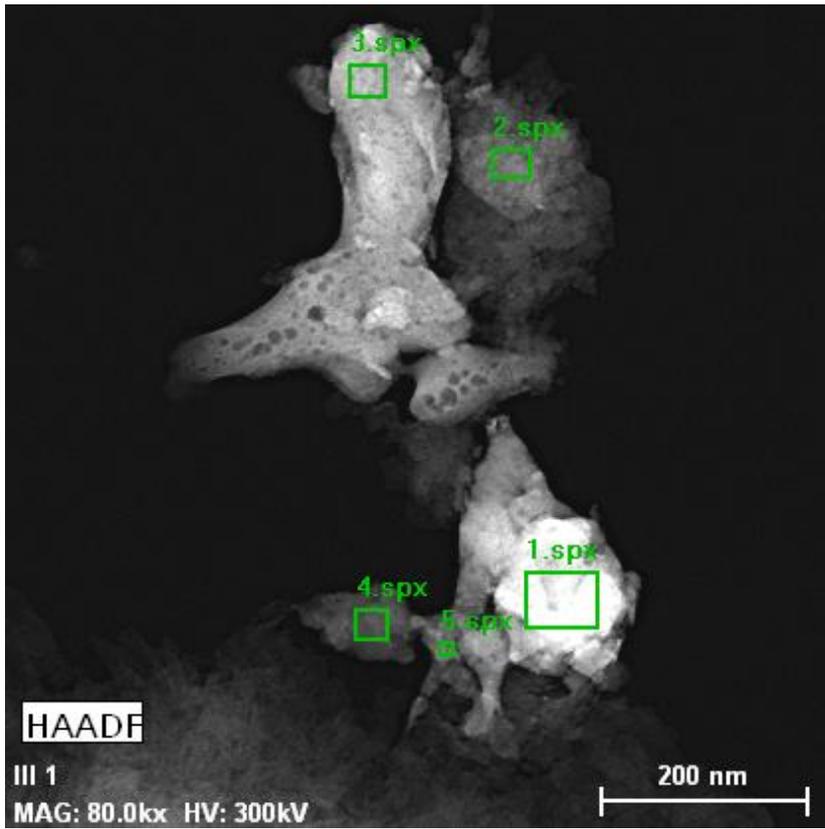


Figura 91: Mapeo de elementos y análisis EDS de la sección III.6 (ver Figura anterior).

Fuente: Elaboración propia.

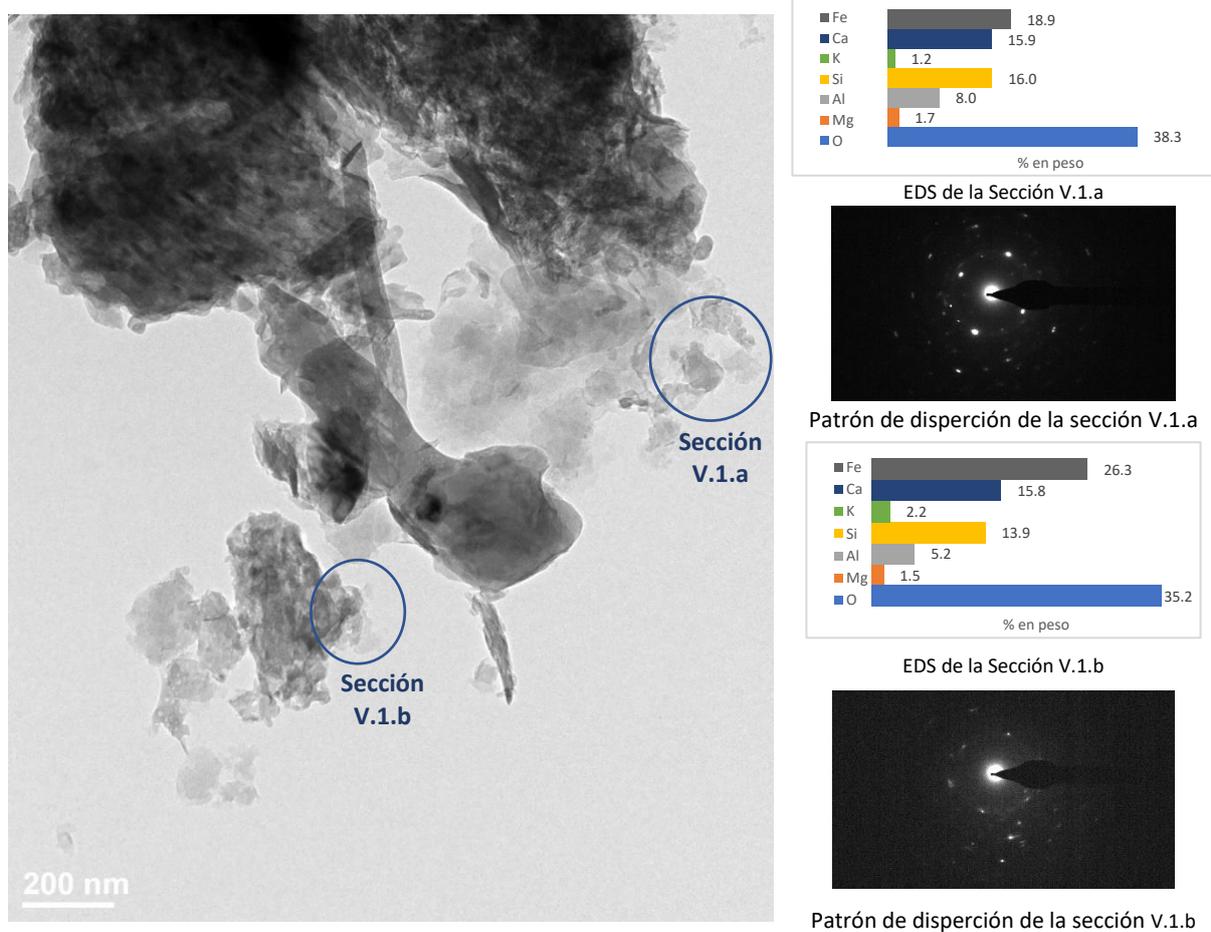


Figura 92: Imagen TEM, análisis y patrón de dispersión de electrones de la sección V.1 de una muestra de BTC de la serie V. **Fuente:** Elaboración propia.

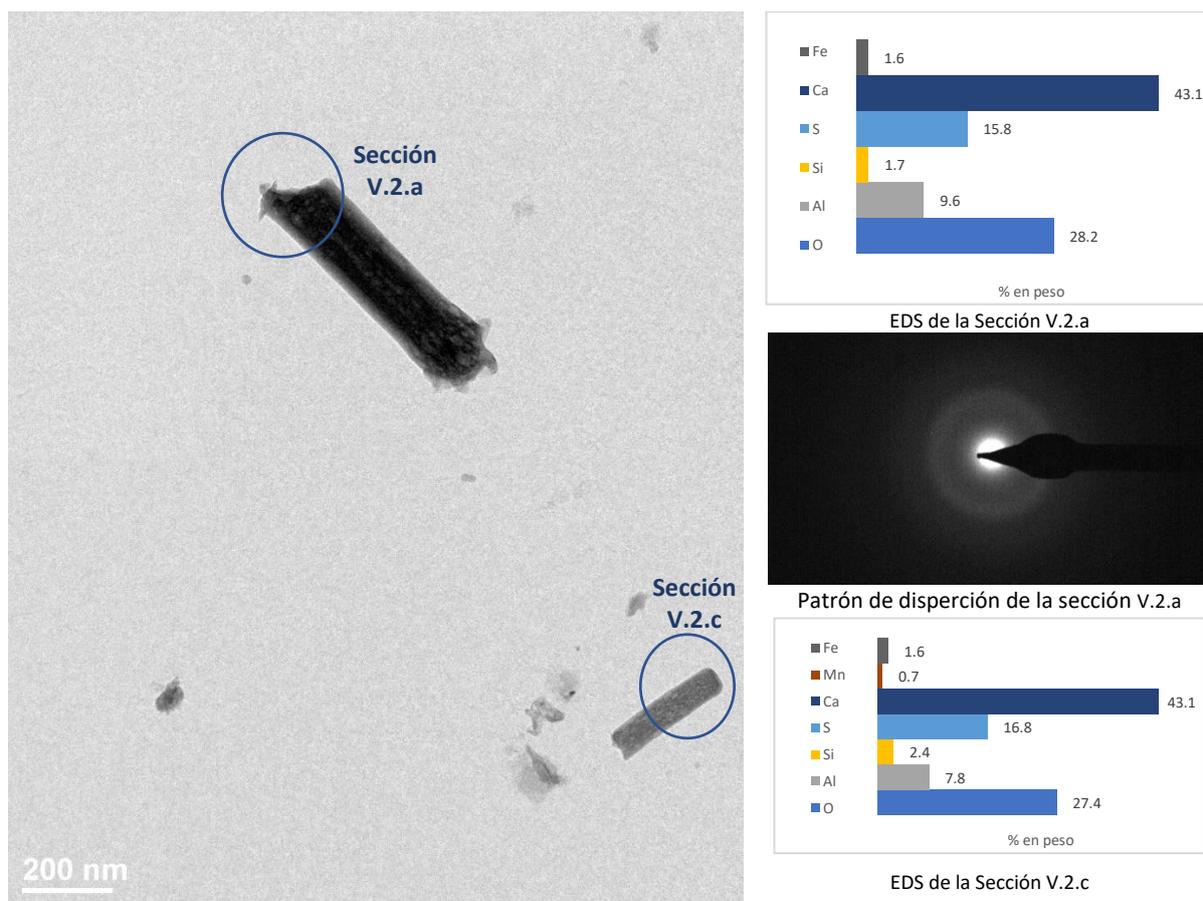


Figura 93: Imagen TEM, análisis EDS y patrón de dispersión de electrones de la sección V.2 de una muestra de BTC de la serie V. **Fuente:** Elaboración propia.

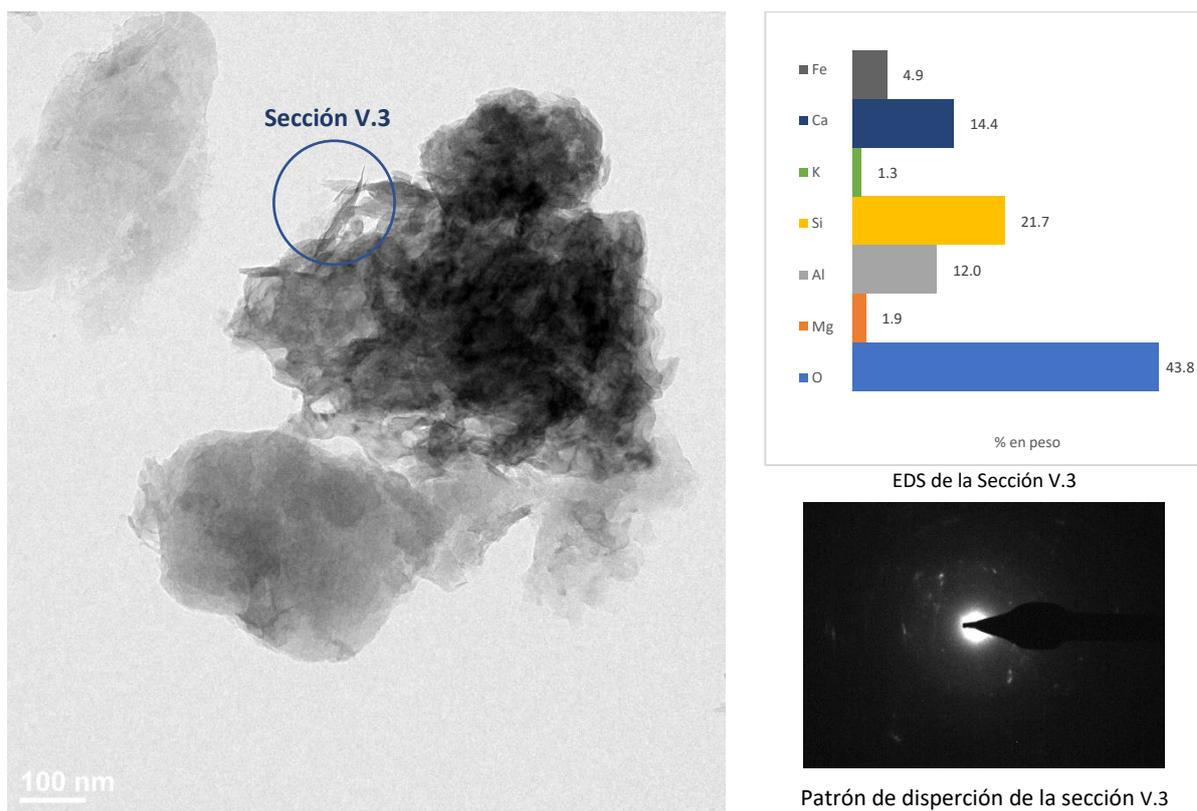


Figura 94: Imagen TEM, análisis EDS y patrón de dispersión de electrones de la sección V.3 de una muestra de BTC de la serie V. **Fuente:** Elaboración propia.

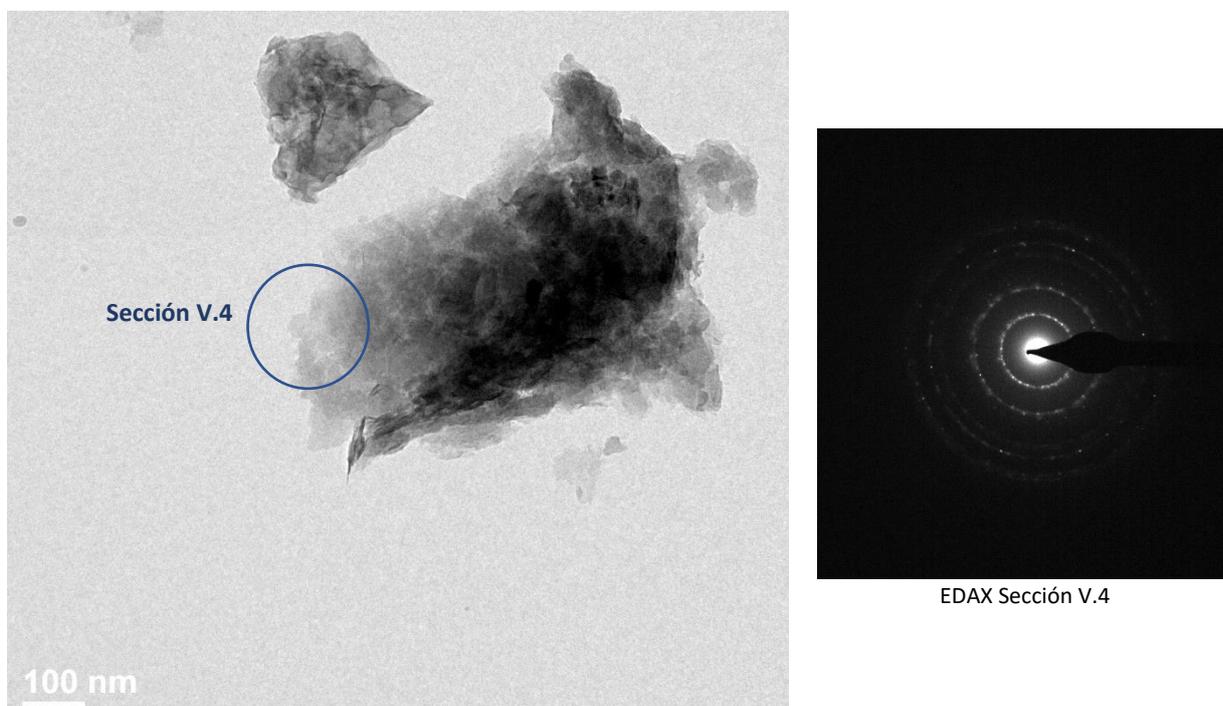


Figura 95: Imagen TEM y patrón de dispersión de electrones de la sección V.4 de una muestra de BTC de la serie V. **Fuente:** Elaboración propia.

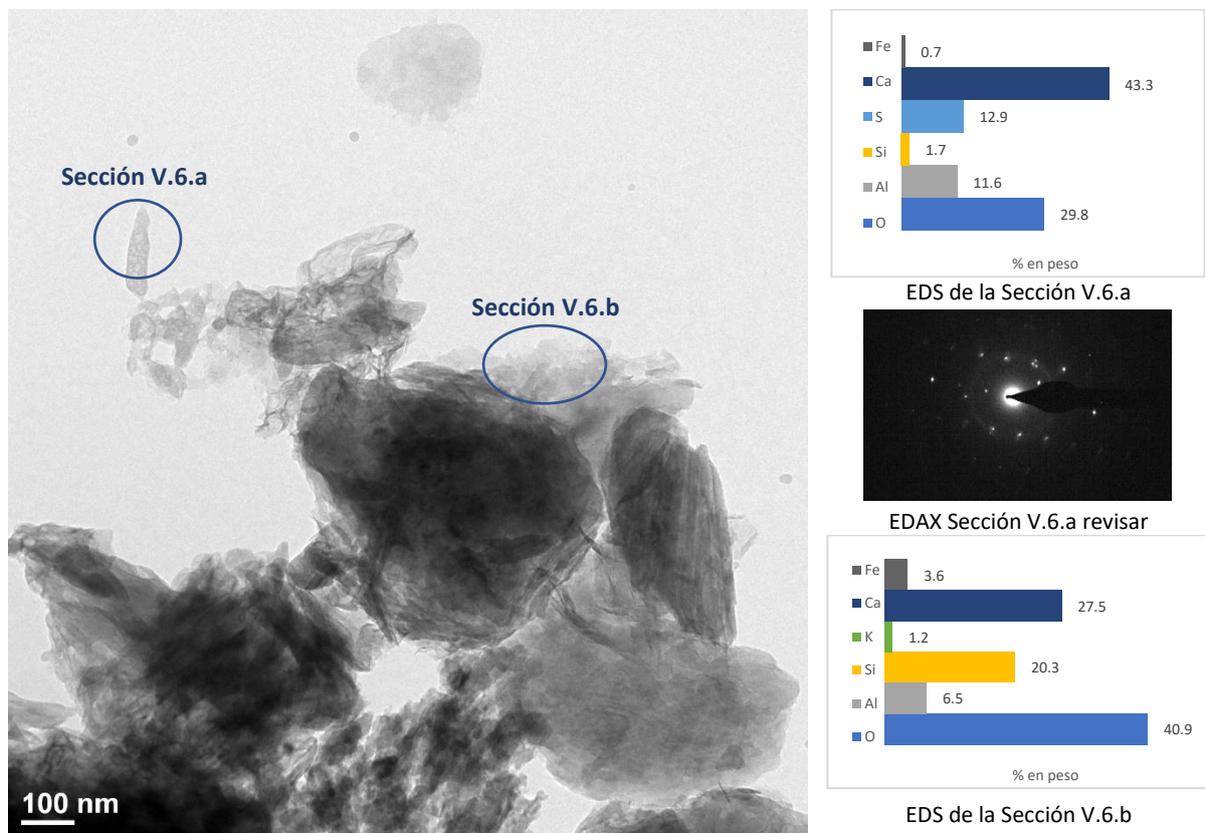


Figura 96: imagen TEM, análisis EDS y patrón de dispersión de electrones de la sección V.6 de una muestra de BTC de la serie V. Fuente: Elaboración propia.

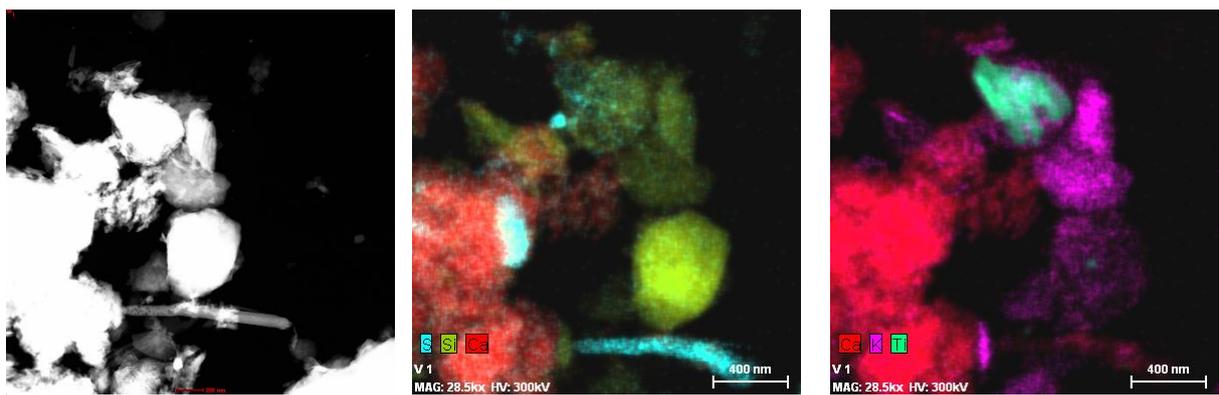


Figura 97: Mapeo de elementos del sector de la sección V.7.

Ing. Santiago Cabrera

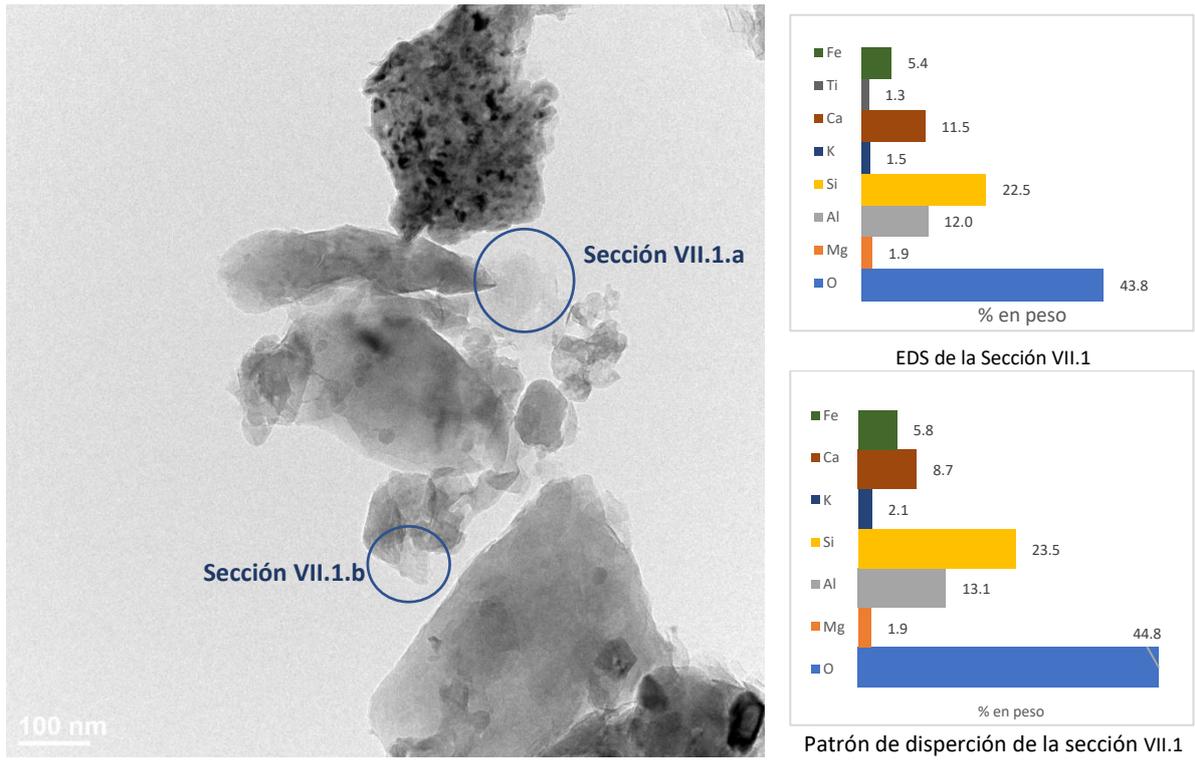


Figura 98: imagen TEM y análisis EDS de la sección VII.1 de una muestra de BTC de la serie VII.
Fuente: Elaboración propia.

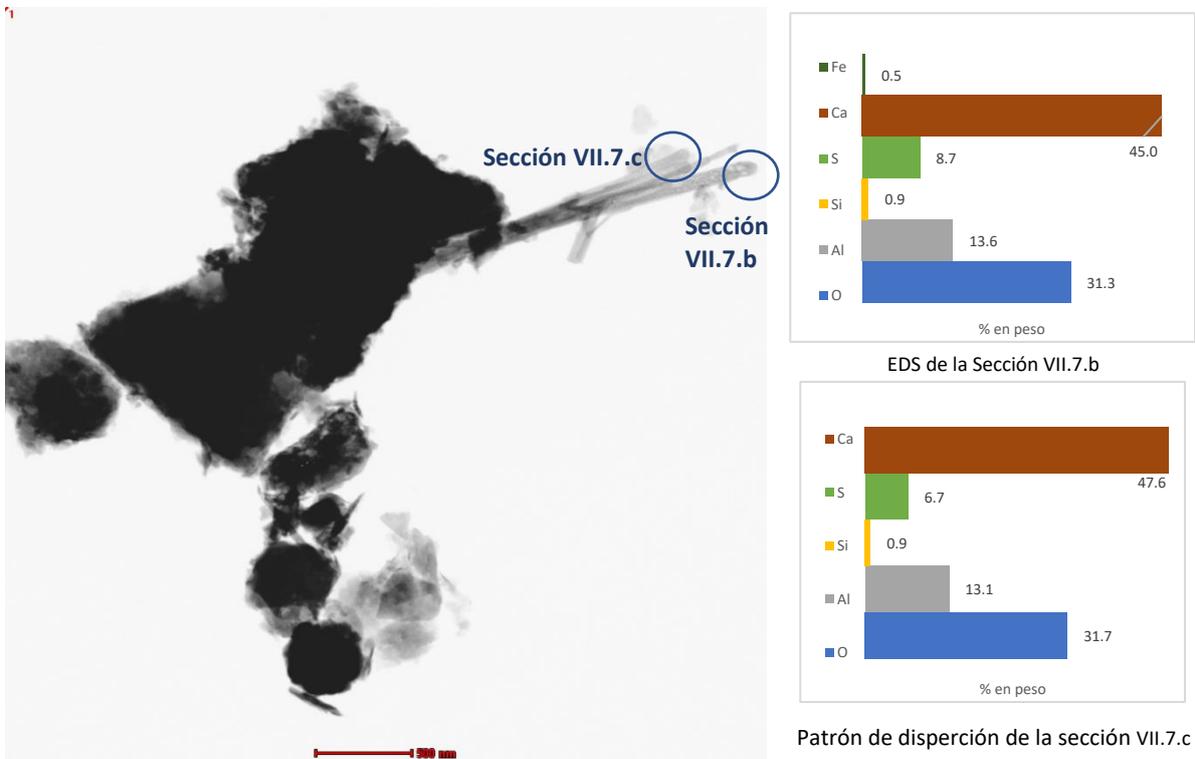


Figura 99: imagen TEM y análisis EDS de la sección VII.7 de una muestra de BTC de la serie VII.
Fuente: Elaboración propia.

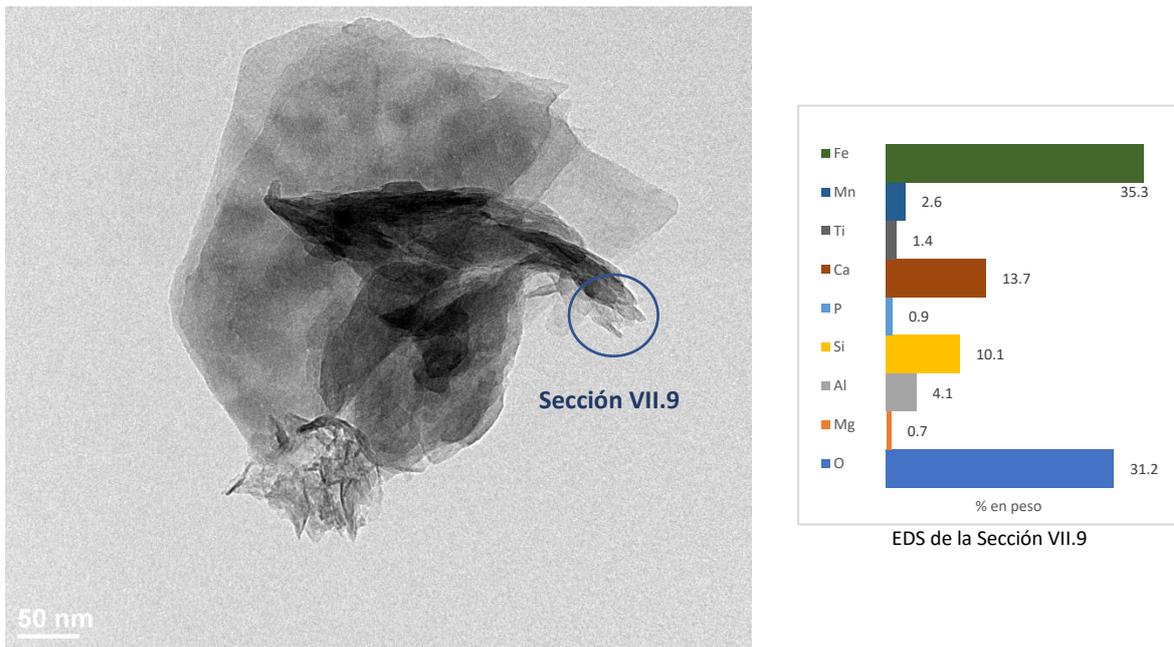
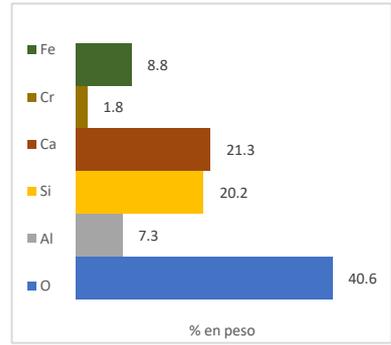
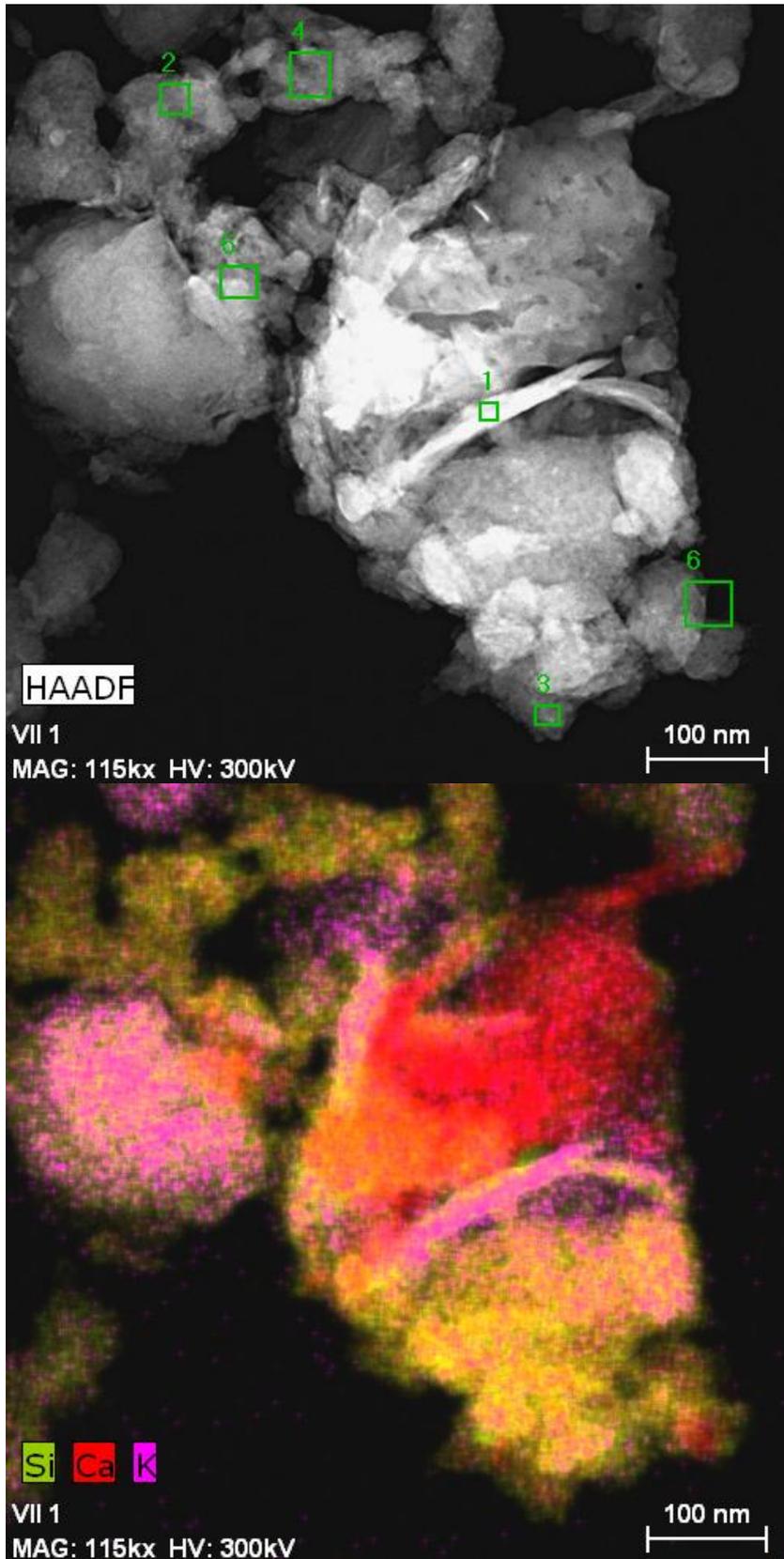
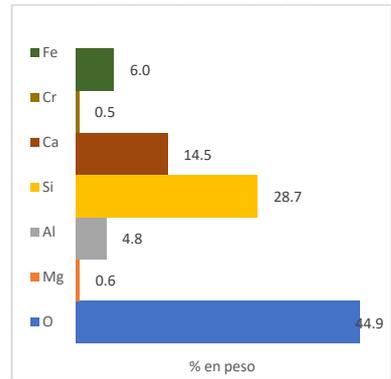


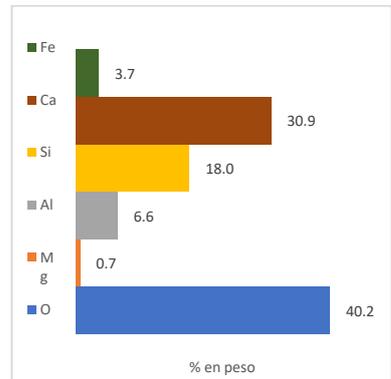
Figura 100: imagen TEM y análisis EDS de la sección VII.9 de una muestra de BTC de la serie VII.
Fuente: Elaboración propia.



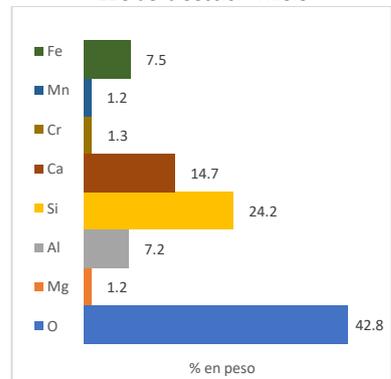
EDS de la Sección VII.3.3



EDS de la Sección VII.3.4



EDS de la Sección VII.3.5



EDS de la Sección VII.3.6

Figura 101: Mapeo de elementos y análisis EDS de la sección VII.3. Fuente: Elaboración propia

IV.4 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS

IV.4.a Densidad seca

En la Tabla 26 y Tabla 27 se presentan los valores individuales de la determinación de la densidad seca de los diferentes tipos de probetas confeccionadas. Además, en la Figura 102 y Figura 103 se muestran las densidades medias de cada serie de probetas cilíndricas y BTC producidos en la empresa Eco3 Ingeniería, con sus correspondientes desviaciones estándar.

Tabla 26: Densidad seca de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Serie	Peso seco (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Densidad seca (kgf/m ³)			
				ρ_i	ρ_{media}	S_d	
I	a	232	5.05	6.75	1715.97	1626.63	29.33
	b	231	5.05	7.10	1624.35		
	c	231	5.05	7.10	1624.35		
	d	232	5.05	7.20	1608.73		
	e	232	5.05	7.20	1608.73		
	f	232	5.05	7.15	1619.97		
	g	232	5.05	7.10	1631.38		
	h	231	5.05	7.15	1612.99		
	i	231	5.05	7.15	1612.99		
	j	232	5.05	7.15	1619.97		
	k	232	5.05	7.20	1608.73		
l	232	5.05	7.10	1631.38			
II	a	232	5.04	7.00	1661.26	1640.49	23.25
	b	232	5.03	7.15	1632.88		
	c	235	5.04	7.05	1670.81		
	d	232	5.03	7.10	1644.38		
	e	232	5.03	6.90	1692.05		
	f	232	5.05	7.15	1619.97		
	g	228	5.05	7.00	1626.16		
	h	228	5.02	7.08	1627.06		
	i	228	5.05	7.00	1626.16		
	j	227	5.05	6.93	1635.38		
	k	228	5.05	6.95	1637.86		
l	226	5.05	7.00	1611.89			

III	a	236	5.08	7.04	1653.94	1648.90	8.45
	b	236	5.08	7.014	1660.08		
	c	236	5.08	7.08	1644.60		
	d	236	5.08	7.10	1639.97		
	e	235	5.08	7.04	1646.94		
	f	235	5.08	7.05	1644.60		
	g	235	5.08	6.98	1661.09		
	h	236	5.08	7.10	1639.97		
IV	a	233	5.1	7.10	1606.45	1606.65	15.85
	b	233	5.06	7.10	1631.95		
	c	233	5.1	7.05	1617.84		
	d	230	5.08	7.03	1614.19		
	e	231	5.08	7.10	1605.22		
	f	229	5.1	7.10	1578.87		
	g	233	5.1	7.00	1629.40		
	h	230	5.1	7.00	1608.42		
	i	230	5.1	7.10	1585.76		
	j	229	5.09	7.04	1598.59		
	k	230	5.1	7.00	1608.42		
	l	230	5.1	7.06	1594.75		
V	a	231	5.1	7.10	1592.66	1608.07	11.13
	b	232	5.1	7.10	1599.55		
	c	232	5.1	7.10	1599.55		
	d	233	5.1	7.10	1606.45		
	e	233	5.1	7.07	1613.26		
	f	232	5.1	7.10	1599.55		
	g	232	5.1	7.12	1595.06		
	h	233	5.08	7.10	1619.12		
	i	232	5.06	7.10	1624.94		
	j	232	5.1	7.05	1610.90		
	k	232	5.1	7.05	1610.90		
	l	232	5.06	7.10	1624.94		
VI	a	232	5.1	7.10	1599.55	1600.76	6.30
	b	232	5.1	7.10	1599.55		
	c	233	5.1	7.13	1599.69		
	d	232	5.1	7.12	1595.06		

Ing. Santiago Cabrera

	e	233	5.1	7.15	1595.21		
	f	232	5.1	7.11	1597.30		
	g	231	5.1	7.10	1592.66		
	h	232	5.08	7.10	1612.17		
	i	233	5.1	7.12	1601.93		
	j	233	5.08	7.14	1610.05		
	k	232	5.1	7.11	1597.30		
	l	232	5.1	7.06	1608.61		
VII	a	234	5.1	7.14	1604.30	1609.18	13.06
	b	234	5.1	7.12	1608.81		
	c	234	5.1	7.15	1602.06		
	d	234	5.1	7.10	1613.34		
	e	233	5.1	7.18	1588.55		
	f	234	5.1	7.05	1624.78		
	g	234	5.1	7.14	1604.30		
	h	234	5.1	7.19	1593.15		
	i	234	5.1	7.05	1624.78		
	j	234	5.1	7.16	1599.82		
	k	233	5.1	7.06	1615.55		
	l	234	5.08	7.08	1630.66		
VIII	a	233	5.1	7.15	1595.21	1602.62	10.53
	b	234	5.1	7.10	1613.34		
	c	233	5.1	7.15	1595.21		
	d	233	5.1	7.05	1617.84		
	e	233	5.07	7.15	1614.15		
	f	233	5.1	7.20	1584.13		
	g	233	5.1	7.12	1601.93		
	h	232	5.1	7.05	1610.90		
	i	232	5.1	7.15	1588.37		
	j	233	5.1	7.10	1606.45		
	k	233	5.1	7.12	1601.93		
	l	233	5.1	7.12	1601.93		

Tabla 27: Densidad seca de los BTC producidos en la empresa Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

Serie	ID	Peso seco (g)	Densidad (Kgf/m ³)		
			ρ_i	ρ_{media}	S_d
I	1	2130.00	1570.70	1476.68	94.84
	2	1825.00	1345.79		
	3	2045.00	1508.02		
	4	2010.00	1482.21		
II	1	2105.00	1552.27	1517.24	123.41
	2	1965.00	1449.03		
	3	2270.00	1673.94		
	4	1890.00	1393.72		
III	1	2135.00	1574.39	1630.45	42.64
	2	2144.29	1687.98		
	3	2097.31	1675.28		
	4	2172.82	1638.02		
	5	2210.00	1629.70		
	6	2205.00	1626.01		
	7	2145.00	1581.77		
IV	1	2015.00	1485.90	1502.61	28.68
	2	2010.24	1522.62		
	3	1895.96	1544.97		
	4	1985.55	1521.83		
	5	2035.00	1500.65		
	6	1985.00	1463.78		
	7	2005.00	1478.53		
V	1	2295.16	1714.06	1678.35	85.34
	2	2345.04	1660.65		
	3	2021.58	1824.74		
	4	2165.00	1596.51		
	5	2165.00	1596.51		
	6	2275.00	1677.63		
VI	1	2006.73	1562.88	1541.16	93.98
	2	2137.66	1664.85		
	3	1867.72	1454.62		
	4	2210.00	1629.70		

	5	1945.00	1434.28		
	6	2035.00	1500.65		
VII	1	2294.88	1751.79	1736.51	70.37
	2	2155.83	1610.00		
	3	2312.44	1703.63		
	4	2405.00	1773.49		
	5	2445.00	1802.99		
	6	2410.00	1777.18		
VIII	1	2182.34	1713.48	1627.89	83.42
	2	2110.89	1644.00		
	3	2217.73	1727.21		
	4	2135.00	1574.39		
	5	2165.00	1596.51		
	6	2050.00	1511.71		

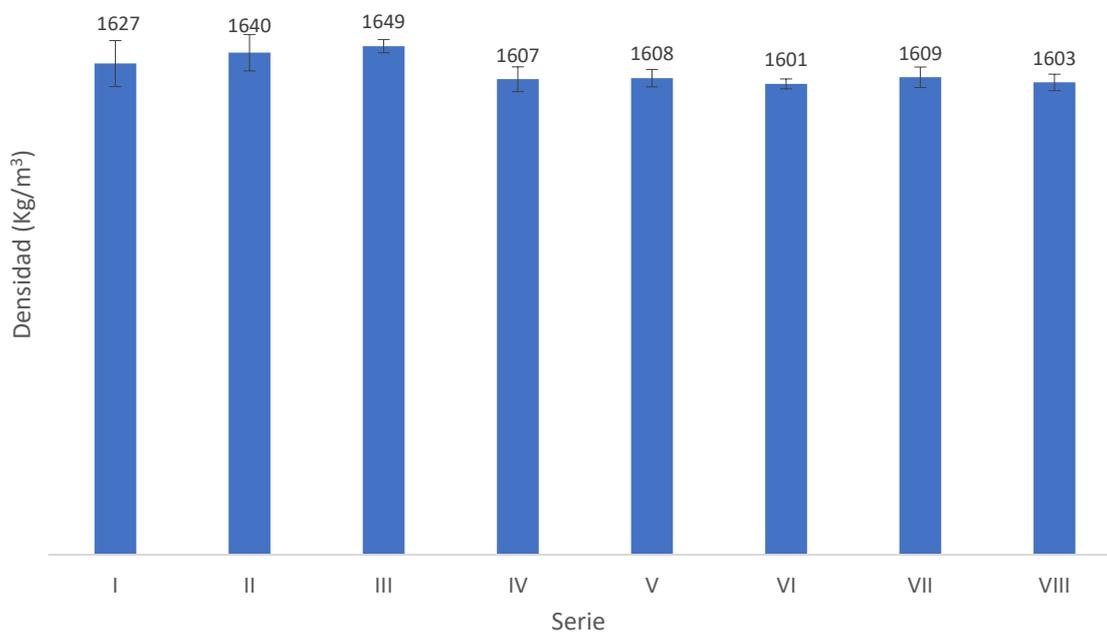


Figura 102: Densidad seca de las series de probetas cilíndricas producidos en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

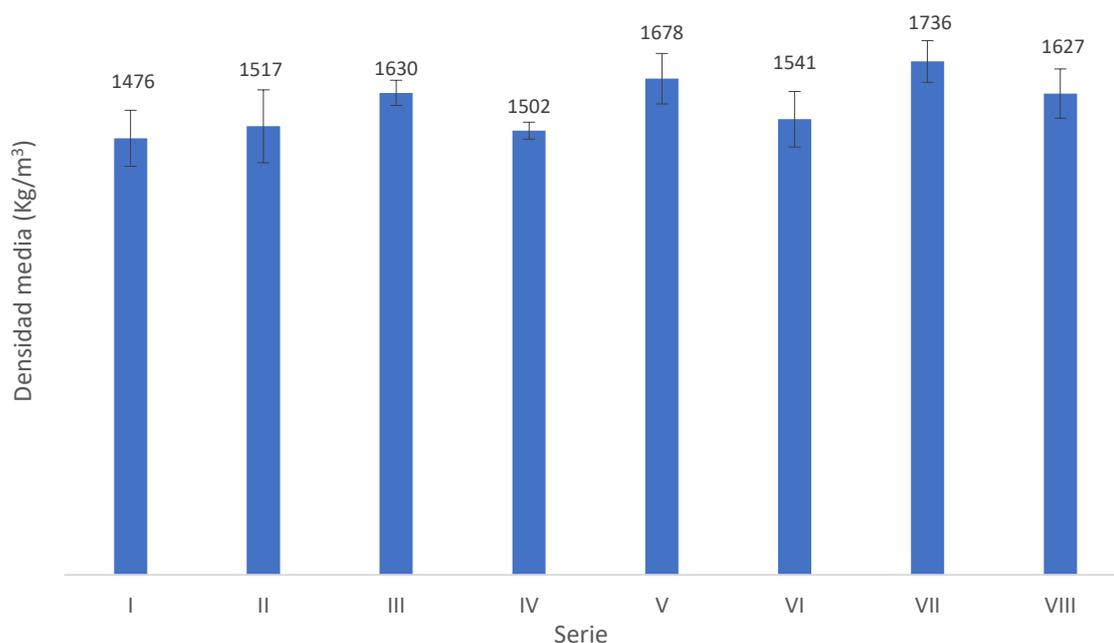


Figura 103: Densidad seca de los BTC producidos en la empresa Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.b Resistencia a compresión seca

IV.4.b.i BTC producidos en laboratorio

En la Tabla 28 se exponen las resistencias individuales de cada una de las probetas (medios bloques) de BTC producidos en laboratorio, mientras que las resistencias medias a compresión de cada una de estas series agrupados en función de las diferentes relaciones Tierra/Arena y los diversos contenidos de cal y cemento como estabilizante se condensan entre la Figura 104 y Figura 110.

Tabla 28: Resistencia a compresión a 28 días de los BTC producidos en el laboratorio de la UTN FRSF.
Fuente: Elaboración propia.

Serie	ID	Resistencia (Kgf/cm ²)		
		σ_i	σ_{med}	S_d
1	1	7.28	7.77	0.46
	2	8.47		
	3	8.05		
	4	7.39		
	5	7.51		
	6	7.93		

Ing. Santiago Cabrera

2	Tierra - A15%	1	8.05	6.64	1.37
		2	6.93		
		3	6.47		
		4	4.70		
		5	5.54		
		6	8.16		
3	Tierra - A30%	1	7.08	5.74	1.32
		2	6.66		
		3	6.24		
		4	4.70		
		5	6.16		
		6	3.62		
4	Tierra - A50%	1	9.55	7.62	2.59
		2	3.23		
		3	5.66		
		4	9.28		
		5	8.78		
		6	9.24		
5	Cto 10% - A0%	1	23.92	28.22	4.67
		2	35.79		
		3	27.74		
		4	22.77		
		5	29.51		
		6	29.58		
6	Cto 10% - A15%	1	32.59	29.14	6.52
		2	23.73		
		3	31.05		
		4	18.84		
		5	36.33		
		6	32.32		
7	Cto 10% - A30%	1	57.17	48.27	5.24
		2	45.61		
		3	43.30		
		4	47.77		
		5	44.30		
		6	51.47		

Ing. Santiago Cabrera

8	Cto 10% - A50%	1	47.77	50.09	5.30
		2	52.59		
		3	48.77		
		4	41.91		
		5	57.63		
		6	51.85		
9	Cal 10% - A0%	1	8.63	7.27	1.86
		2	6.70		
		3	10.40		
		4	5.74		
		5	6.31		
		6	5.85		
10	Cal 10% - A15%	1	6.35	6.53	0.67
		2	7.35		
		3	6.47		
		4	7.24		
		5	5.54		
		6	6.24		
11	Cal 10% - A30%	1	5.70	6.56	1.17
		2	5.70		
		3	8.51		
		4	7.47		
		5	6.08		
		6	5.89		
12	Cal 10% - A50%	1	5.04	5.62	0.44
		2	6.16		
		3	5.47		
		4	5.27		
		5	6.08		
		6	5.70		
13	Cto 2,5%	1	6.66	8.13	1.40
		2	10.24		
		3	7.32		
		4	9.47		
		5	7.47		
		6	7.62		

Ing. Santiago Cabrera

14	Cto 5%	1	14.37	13.94	1.56
		2	15.18		
		3	11.09		
		4	15.41		
		5	14.14		
		6	13.48		
15	Cto 15%	1	52.35	60.77	7.69
		2	66.07		
		3	65.61		
		4	49.47		
		5	65.88		
		6	65.22		
16	Cto 20%	1	85.22	74.26	12.39
		2	78.28		
		3	57.86		
		4	87.30		
		5	76.36		
		6	60.56		
17	Cal 2,5%	1	4.62	5.67	0.83
		2	4.77		
		3	5.54		
		4	6.66		
		5	6.16		
		6	6.24		
18	Cal 5%	1	6.16	5.72	0.32
		2	5.54		
		3	5.47		
		4	5.51		
		5	6.08		
		6	5.54		
19	Cal 15%	1	5.47	5.97	0.96
		2	6.12		
		3	4.77		
		4	6.51		
		5	7.51		
		6	5.47		

Ing. Santiago Cabrera

20	Cal 20%	1	5.74	5.39	0.53
		2	5.62		
		3	4.85		
		4	6.08		
		5	5.35		
		6	4.70		

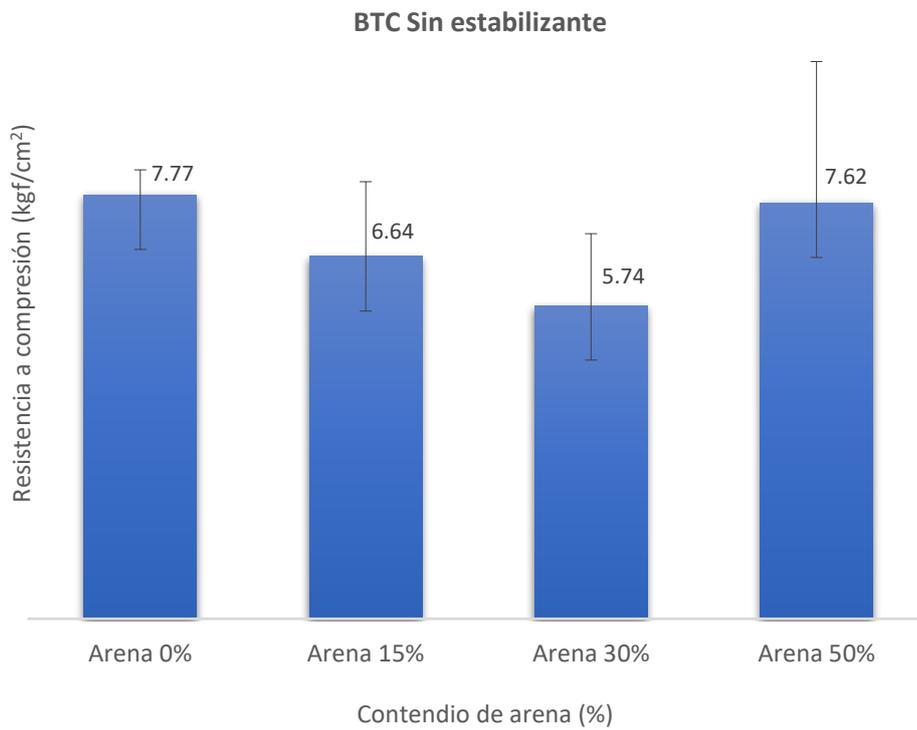


Figura 104: Resistencia a compresión de las series de BTC sin estabilizante y con diferentes relaciones Tierra/Arena. **Fuente:** Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

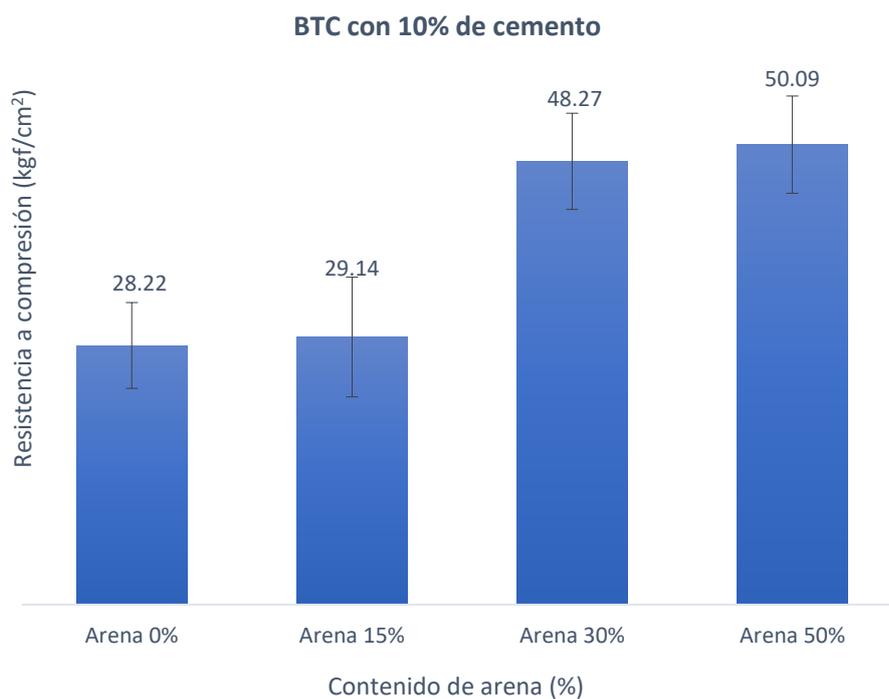


Figura 105: Resistencia a compresión de las series de BTC producidas con diferentes relaciones Tierra/Arena y un 10% de cemento Portland. **Fuente:** Elaboración propia.

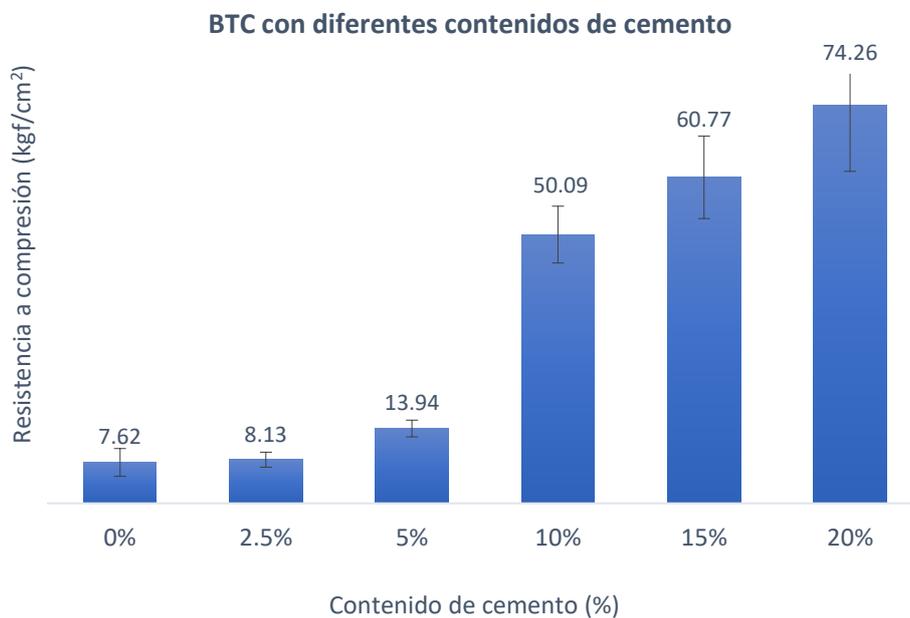


Figura 106: Resistencia a compresión de las series de BTC producidas con una relación Tierra/Arena de 1:1 y diferentes contenidos de cemento Portland. **Fuente:** Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

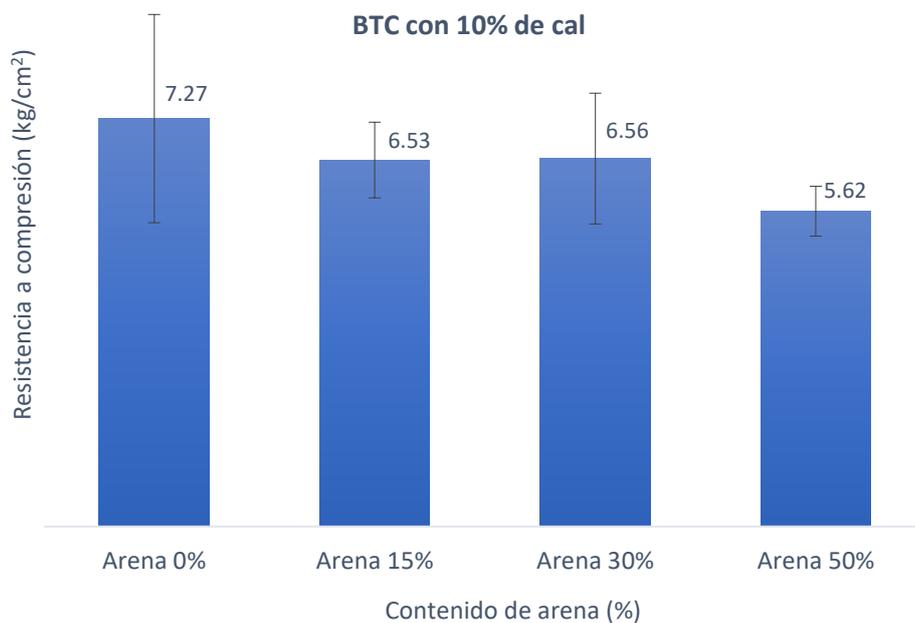


Figura 107: Resistencia a compresión de las series de BTC producidas con diferentes relaciones Tierra/Arena y un 10% de cal. **Fuente:** Elaboración propia.

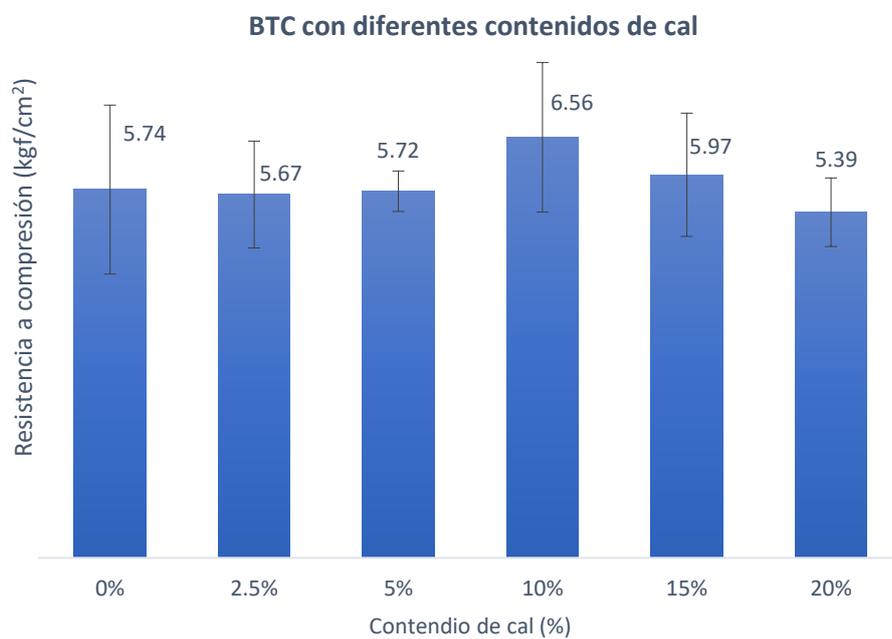


Figura 108: Resistencia a compresión de las series de BTC producidas con una relación Tierra/Arena de 7:3 y diferentes contenidos de cal. **Fuente:** Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

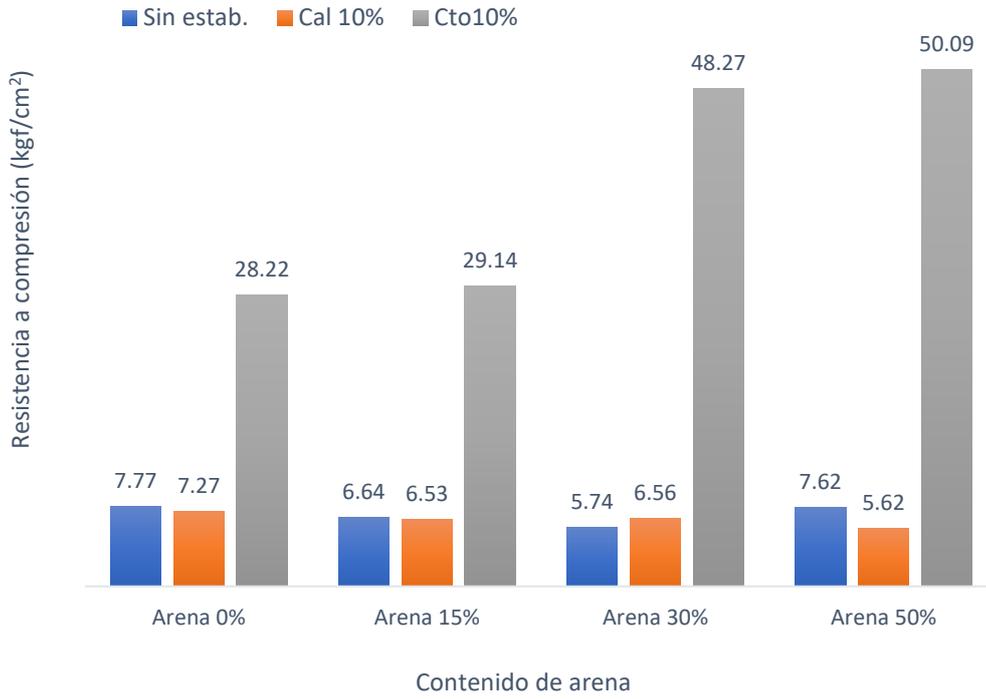


Figura 109: Resistencia a compresión de las series de BTC producidas sin estabilizante, con 10% de cal y 10% de cemento. **Fuente:** Elaboración propia.

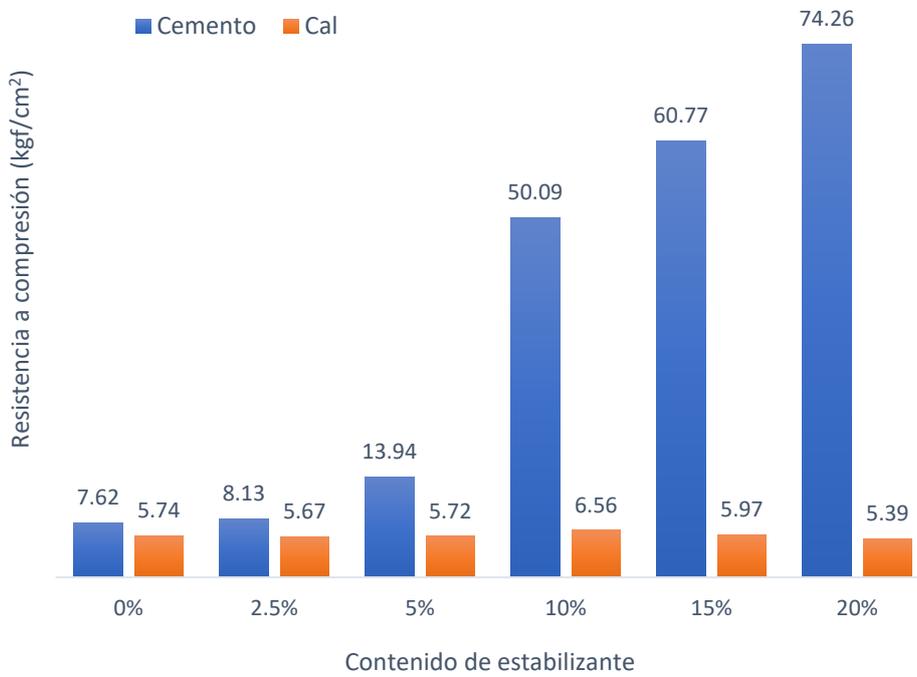


Figura 110: Resistencia a compresión de las series de BTC producidas con diferentes contenidos de cal y cemento, y relaciones Tierra/Arena constantes. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.4.b.ii Probetas cilíndricas

En la Tabla 29 se exponen los valores individuales de resistencia a compresión de cada una de las probetas cilíndricas ensayadas, mientras que en la Figura 111 se resumen las resistencias medias a compresión seca de cada una de las series.

Tabla 29: Resistencia a compresión seca de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Serie		Resistencia (Kgf/cm ²)		
		σ_i	σ_{med}	S_d
I	a	7.23	7.69	0.49
	b	8.00		
	c	8.39		
	d	7.31		
	e	7.54		
II	a	4.35	4.12	0.22
	b	4.27		
	c	3.89		
	d	3.89		
	e	4.20		
III	a	47.80	50.66	5.91
	b	49.12		
	c	44.92		
	d	60.46		
	e	50.98		
IV	a	7.15	5.69	1.04
	b	4.90		
	c	5.83		
	d	6.06		
	e	4.51		
V	a	5.13	5.32	0.95
	b	4.51		
	c	6.45		
	d	4.35		
	e	6.14		
VI	a	5.36	5.04	0.83
	b	5.75		

	c	4.74		
	d	5.60		
	e	3.73		
VII	a	1.87	4.48	1.47
	b	4.90		
	c	5.21		
	d	5.13		
	e	5.28		
VIII	a	5.28	4.62	1.01
	b	4.20		
	c	5.21		
	d	5.36		
	e	3.03		

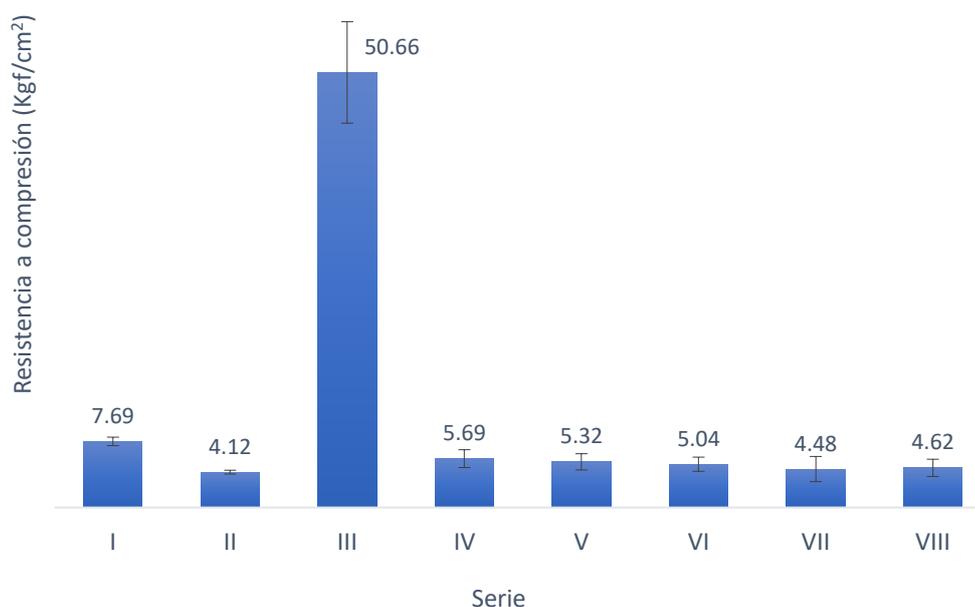


Figura 111: Resistencia a compresión seca las probetas cilíndricas moldeadas en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.b.iii BTC producidos en fábrica

En la Tabla 30 se exponen las resistencias individuales de cada una de las probetas de BTC producidas en fábrica (medios bloques) ensayadas a compresión seca. Asimismo, la resistencia media a compresión seca de cada una de las series junto con su desviación estándar se plasma en la Figura 112.

Tabla 30: Resistencia a compresión seca de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

Serie	ID	Resistencia (Kgf/cm ²)		
		σ_i	σ_{med}	S_d
I	1	2.84	3.38	0.35
	2	3.46		
	3	3.41		
	4	3.82		
	5	3.36		
II	1	5.19	3.88	1.69
	2	6.12		
	3	3.15		
	4	2.19		
	5	2.74		
III	1	23.62	21.87	2.43
	2	19.67		
	3	19.05		
	4	22.38		
	5	24.62		
IV	1	2.40	2.61	0.35
	2	3.12		
	3	2.22		
	4	2.53		
	5	2.79		
V	1	4.54	5.86	1.18
	2	5.73		
	3	5.60		
	4	7.79		
	5	5.63		
VI	1	3.05	3.74	0.68
	2	3.36		
	3	4.23		
	4	3.38		
	5	4.67		
VII	1	3.79	5.20	0.89
	2	6.09		

	3	5.70		
	4	5.47		
	5	4.93		
VIII	1	3.36	3.62	0.77
	2	2.50		
	3	3.61		
	4	4.52		
	5	4.13		

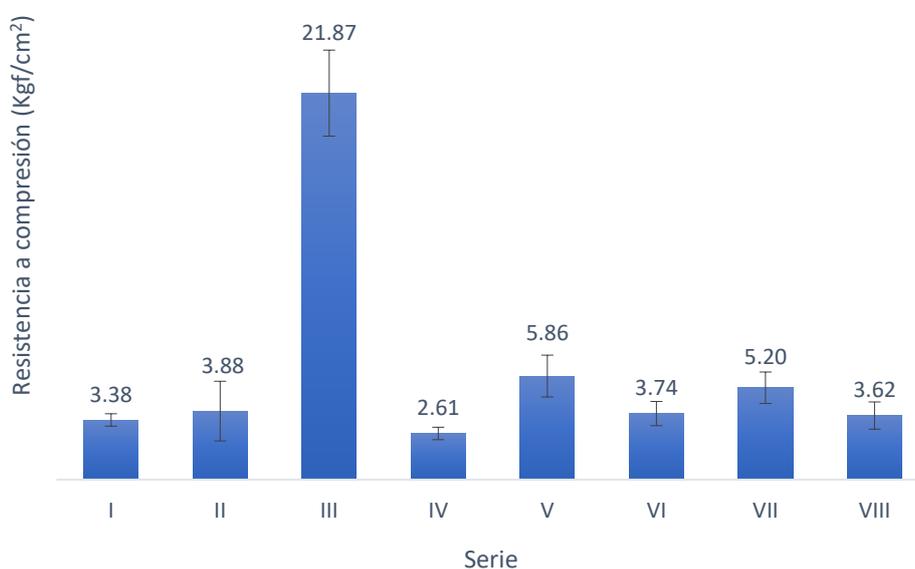


Figura 112: Resistencia a compresión seca de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.c Resistencia a compresión saturada

Es importante remarcar que ninguno de los “ensayos húmedos” pudo realizarse sobre las series I y II, ya que, al no contar con estabilizantes químicos, al ser sumergidas en agua, como puede apreciarse en la Figura 113, las probetas perdieron su estabilidad dimensional.



Figura 113: Estado de una probeta de la serie I tras ser sumergida durante 24 hs para la realización del ensayo de absorción de agua por inmersión y resistencia a compresión saturada. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.4.c.i Probetas cilíndricas

Las resistencias individuales de cada probeta cilíndrica se exponen en la Tabla 31, mientras que en Figura 114 se presenta de manera gráfica la resistencia media a compresión saturada de cada serie, junto con su desviación estándar.

Tabla 31: Resistencia a compresión saturada de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie		Resistencia (Kgf/cm ²)			Porcentaje de resistencia (%)
		σ_i	σ_{med}	Sd	
III	a	20.05	18.32	1.29	36
	b	16.94			
	c	17.95			
	d	18.34			
IV	a	2.88	2.10	0.59	37
	b	1.87			
	c	1.48			
	d	2.18			
V	a	2.49	2.70	0.44	51
	b	2.25			
	c	2.80			
	d	3.26			
VI	a	2.49	2.31	0.40	46
	b	2.02			

	c	2.80			
	d	1.94			
VII	a	2.80	2.64	0.34	59
	b	3.03			
	c	2.25			
	d	2.49			
VIII	a	2.25	2.18	0.38	47
	b	1.63			
	c	2.33			
	d	2.49			

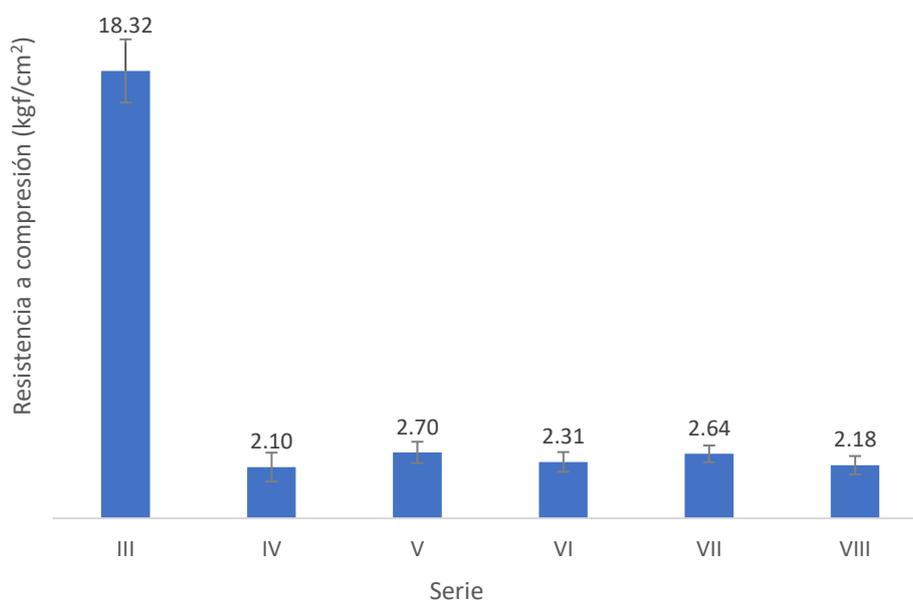


Figura 114: Resistencia a compresión saturada de las probetas cilíndricas moldeadas en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

IV.4.c.ii BTC producidos en fábrica

La resistencia media a compresión saturada de cada medio BTC ensayado puede apreciarse en la Tabla 32, mientras que en la Figura 115 se muestra de manera gráfica la resistencia media a compresión saturada de cada serie, junto con su desviación estándar.

Tabla 32: Resistencia a compresión saturada de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.

Fuente: Elaboración propia.

Serie		Resistencia (Kgf/cm ²)			Porcentaje de resistencia (%)
		σ_i	σ_{med}	S_d	
III	1	10.63	10.84	1.31	50%
	2	9.29			
	3	12.49			
	4	10.94			
IV	1	0.82	1.00	0.20	38%
	2	0.98			
	3	1.29			
	4	0.93			
V	1	2.06	2.04	0.43	35%
	2	1.60			
	3	2.45			
VI	1	2.27	1.52	0.66	41%
	2	1.00			
	3	1.29			
VII	1	2.27	2.17	0.37	42%
	2	2.47			
	3	1.75			
VIII	1	1.55	1.43	0.12	40%
	2	1.31			
	3	1.44			

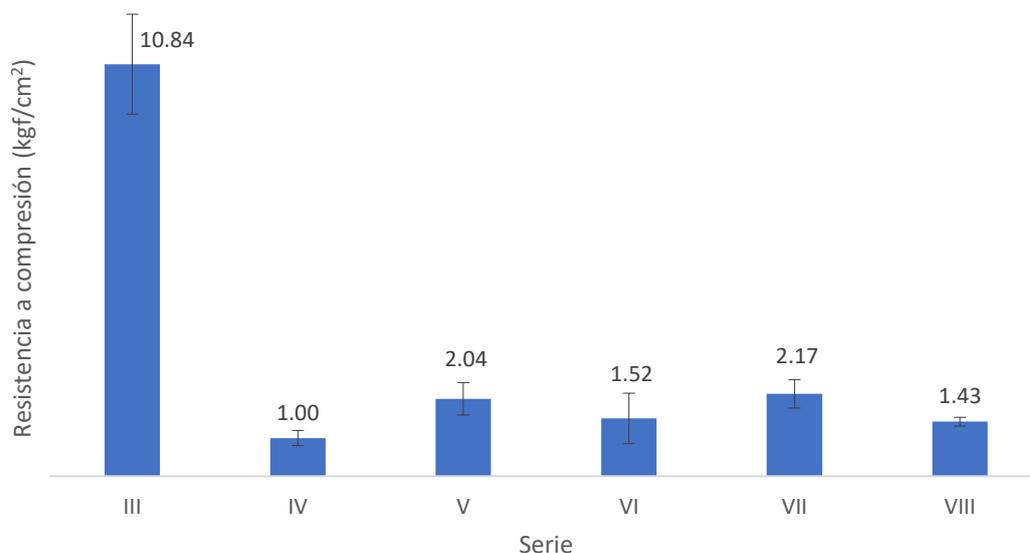


Figura 115: Resistencia a compresión saturada de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.d Absorción de agua por inmersión

Como fue mencionado en el apartado anterior, ninguno de los “ensayos húmedos” pudo realizarse sobre las series I y II ya que, al no contar con estabilizantes químicos, al ser sumergidas en agua las probetas de esta serie perdieron su estabilidad dimensional.

IV.4.d.i Probetas cilíndricas

La absorción de agua por inmersión de cada probeta cilíndrica puede apreciarse en la Tabla 33, mientras que en la Figura 116 se muestra de manera gráfica la absorción de agua media de cada serie, junto con su desviación estándar.

Tabla 33: Absorción de agua por inmersión de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Serie		Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Absorción de agua (%)		
				Ab _i	Ab _{med}	S _d
III	1	236	278	17.80	17.39	0.86
	2	236	278	17.80		
	3	235	277	17.87		
	4	236	274	16.10		
IV	1	230	277	20.43	19.29	1.25
	2	233	274	17.60		

Ing. Santiago Cabrera

	3	230	274	19.13		
	4	230	276	20.00		
V	1	231	277	19.91	19.63	0.28
	2	232	277	19.40		
	3	232	277	19.40		
	4	232	278	19.83		
VI	1	232	277	19.40	19.38	0.39
	2	233	277	18.88		
	3	232	278	19.83		
	4	232	277	19.40		
VII	1	234	280	19.66	19.23	0.49
	2	234	278	18.80		
	3	234	280	19.66		
	4	234	278	18.80		
VIII	1	233	278	19.31	19.55	0.23
	2	233	279	19.74		
	3	232	277	19.40		
	4	233	279	19.74		

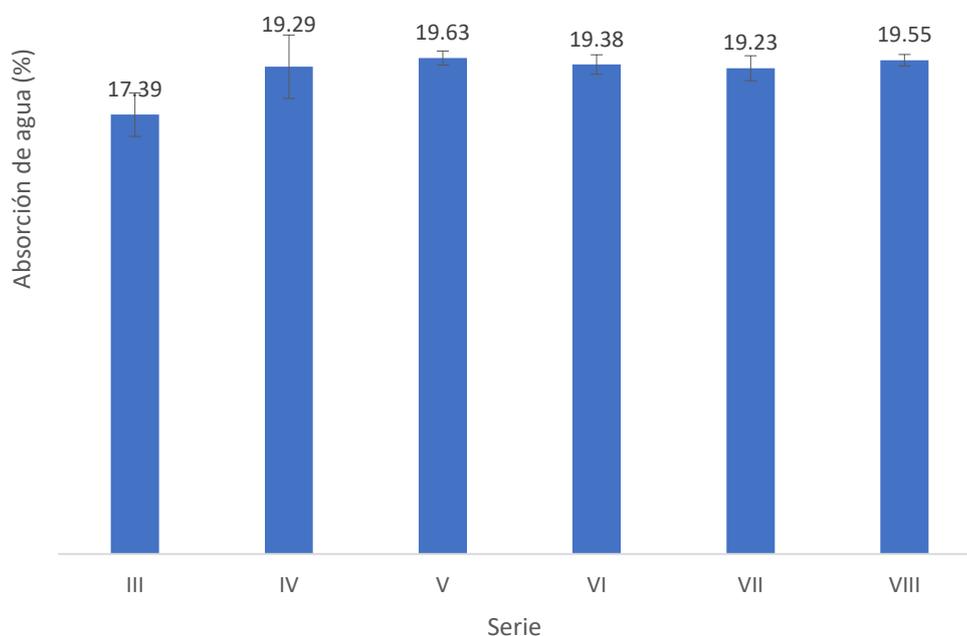


Figura 116: Absorción de agua por inmersión de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.d.ii BTC producidos en fábrica

La absorción de agua por inmersión de cada medio BTC puede apreciarse en la Tabla 34, mientras que en la Figura 117 se muestra de manera gráfica la absorción de agua media de cada serie, junto con su desviación estándar.

Tabla 34: Absorción de agua por inmersión de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

Serie		Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	Absorción de agua (%)		
				Ab _i	Ab _{med}	S _d
III	1	2135	2385	11.71	11.69	1.63
	2	2210	2440	10.41		
	3	2205	2440	10.66		
	4	2145	2445	13.99		
IV	1	2015	2410	19.60	21.45	1.83
	2	2035	2510	23.34		
	3	1985	2435	22.67		
	4	2005	2410	20.20		
V	1	2165	2510	15.94	16.21	1.00
	2	2165	2540	17.32		
	3	2275	2625	15.38		
VI	1	2210	2575	16.52	19.51	2.82
	2	1945	2375	22.11		
	3	2035	2440	19.90		
VII	1	2405	2765	14.97	15.22	0.31
	2	2445	2815	15.13		
	3	2410	2785	15.56		
VIII	1	2135	2515	17.80	17.99	1.92
	2	2165	2515	16.17		
	3	2050	2460	20.00		

Ing. Santiago Cabrera

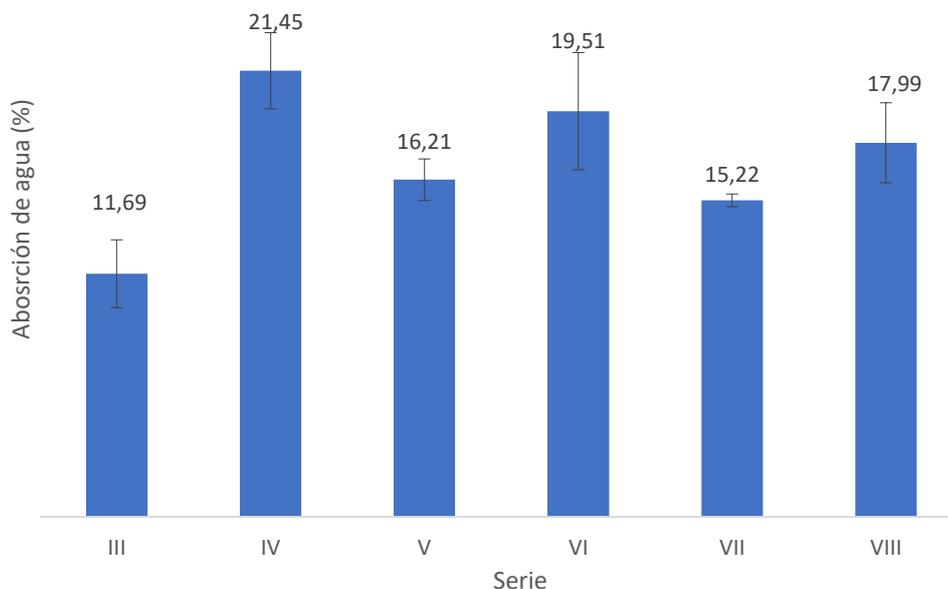


Figura 117: Absorción de agua por inmersión de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.e Absorción de agua por capilaridad

En la Figura 118 pueden apreciarse la realización de este ensayo sobre las probetas cilíndricas y los BTC producidos en fábrica. Como se indicó en los apartados anteriores, este ensayo no pudo realizarse sobre las probetas de la serie I y II por no estar estabilizadas, lo cual se expone en la Figura 119.

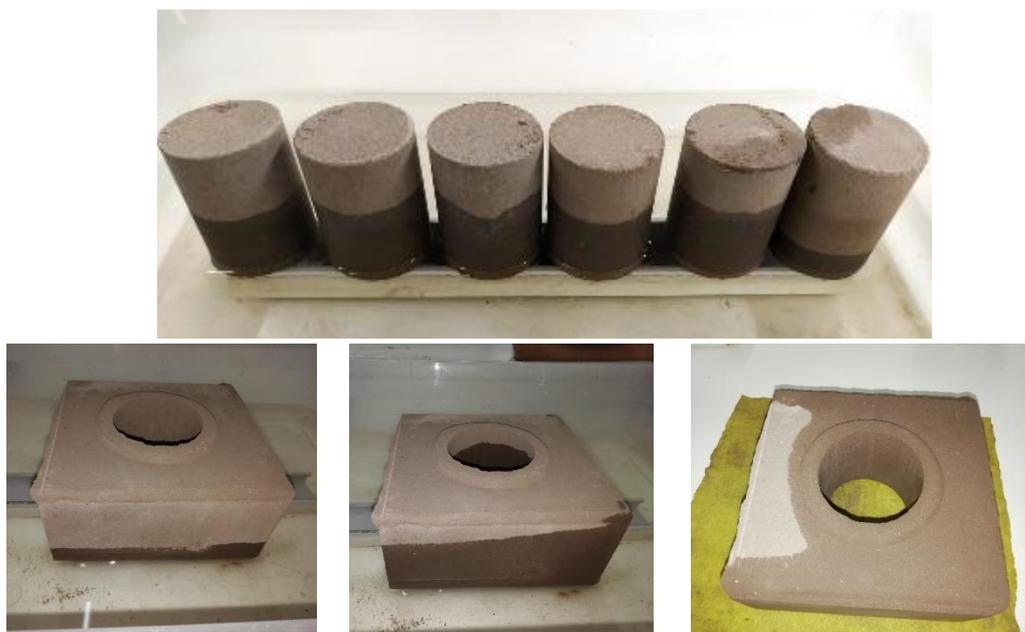


Figura 118: Realización del ensayo de absorción de agua por capilaridad en probetas cilíndricas (arriba) BTC producidos en fábrica (abajo). **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 119: Ensayo de absorción de agua por capilaridad sobre probetas de la serie II.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.e.i Probetas cilíndricas

La absorción de agua por capilaridad de cada probeta cilíndrica puede apreciarse en la Tabla 35, mientras que en la Figura 120 se muestra de manera gráfica la absorción media de cada serie, junto con su desviación estándar.

Tabla 35: Absorción de agua por capilaridad de las probetas cilíndricas
Fuente: Elaboración propia.

Serie		Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	Absorción de agua (%)		Cw (Kg/m ² *min)	
				Ab _i	Ab _{med}	Ab _i	Ab _{med}
III	1	236.99	258.67	9.15	8.78	1.10	1.06
	2	237.00	254.52	7.39		0.89	
	3	236.57	259.75	9.80		1.18	
IV	1	231.9	259.45	11.88	9.16	1.40	1.08
	2	231.2	241.8	4.58		0.54	
	3	230.29	255.65	11.01		1.29	
V	1	232.8	244.28	4.93	5.08	0.58	0.60
	2	233.62	244.57	4.69		0.56	
	3	233.48	246.58	5.61		0.67	
VI	1	232.6	259.3	11.48	9.82	1.36	1.16
	2	233.29	248.57	6.55		0.78	
	3	232.51	259.06	11.42		1.35	
VII	1	234.17	262.84	12.24	11.46	1.46	1.37
	2	233.92	259.56	10.96		1.31	

	3	234.67	260.88	11.17		1.33	
VIII	1	232.22	260.97	12.38	10.68	1.46	1.26
	2	232.06	260.08	12.07		1.43	
	3	233.18	250.88	7.59		0.90	

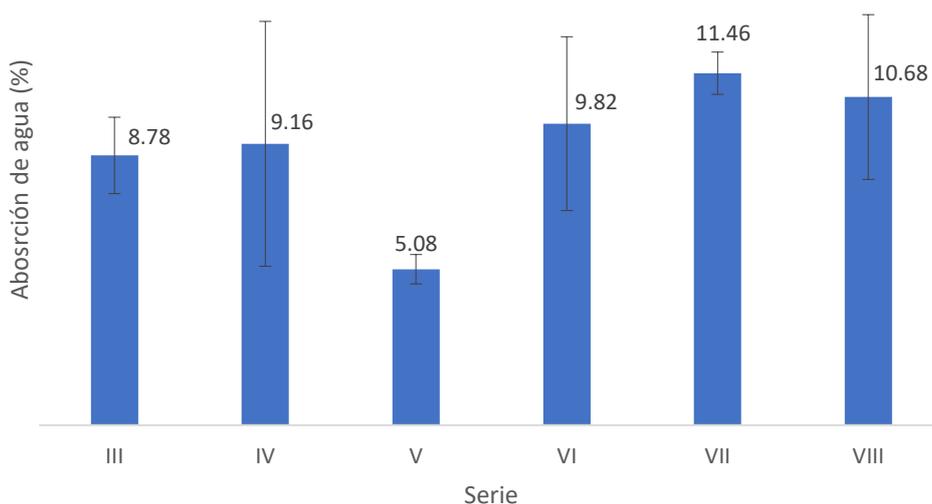


Figura 120: Absorción de agua por capilaridad de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.e.ii BTC producidos en fábrica

La absorción de agua por capilaridad de cada medio BTC producido en fábrica puede apreciarse en la Tabla 36, mientras que en la Figura 121 se muestra de manera gráfica la absorción media de cada serie, junto con su desviación estándar.

Tabla 36: Absorción de agua por capilaridad de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

Serie		Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	Absorción de agua (%)		Cw (Kg/m ² *min)	
				Ab _i	Ab _{med}	Cw _i	Cw _{med}
III	1	2144.29	2442.26	13.90	13.83	1.64	1.61
	2	2097.31	2380.42	13.50		1.56	
	3	2172.82	2478.89	14.10		1.62	
IV	1	2010.24	2407.59	19.80	19.50	2.11	2.07
	2	1895.96	2245.17	18.40		1.94	
	3	1985.55	2389.17	20.30		2.17	
V	1	2295.16	2405.91	4.80	5.03	0.60	0.63
	2	2345.04	2474.70	5.50		0.68	
	3	2021.58	2117.11	4.70		0.60	

VI	1	2006.73	2366.60	17.00	17.73	1.96	1.91
	2	2137.66	2408.14	12.70		1.47	
	3	1867.72	2290.00	22.60		2.30	
VII	1	2294.88	2464.99	7.40	7.55	0.93	0.93
	2	2155.83	2338.44	8.50		1.00	
	3	2312.44	2468.65	6.80		0.85	
VIII	1	2182.34	2406.29	10.30	10.99	1.23	1.30
	2	2110.89	2372.22	12.40		1.42	
	3	2217.73	2447.03	10.30		1.25	

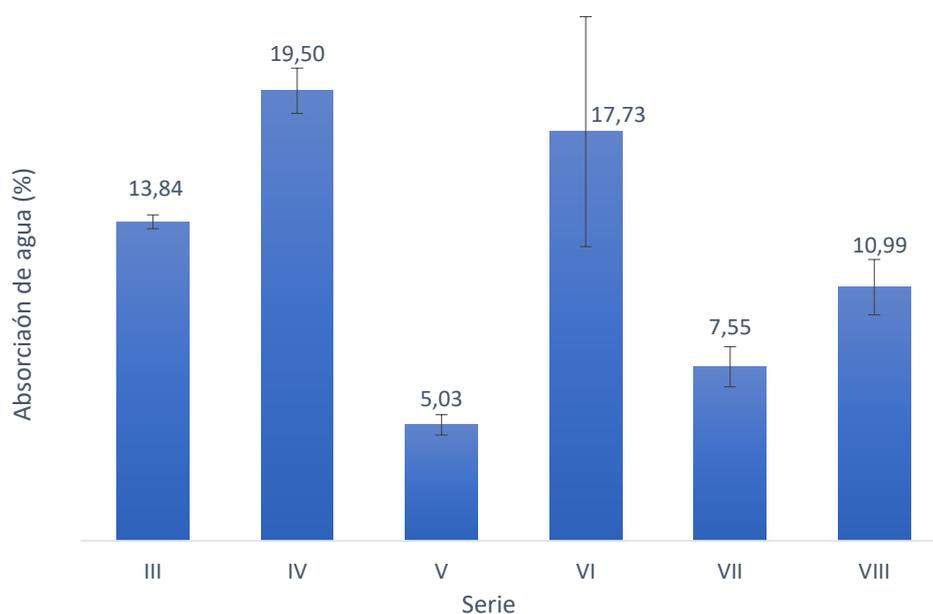


Figura 121: Absorción de agua por capilaridad de los BTC producidos en Eco3 Ingeniería.
Fuente: Elaboración propia.

IV.4.f Resistencia a erosión húmeda

En la Figura 40 puede apreciarse la realización del ensayo de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión sobre medio BTC producido en fábrica. Finalmente, en la Tabla 37 y Tabla 38 se muestran las profundidades de erosión individuales de cada probeta, mientras que en la Figura 122 se expone el patrón de erosión generado sobre cada una de las probetas cilíndricas y BTC sometidos a este ensayo.

Tabla 37: Resultados del ensayo de resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión realizado sobre probetas cilíndricas producidas en laboratorio. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie	ID	Profundidad de erosión (mm)	
		d_i	d_{med}
III	1	1.1	1.2
	2	1.3	
	3	1.2	
IV	1	1.5	1.6
	2	1.5	
	3	1.7	
V	1	12	9.9
	2	7.5	
	3	10.2	
VI	1	19.3	20.6
	2	23.5	
	3	19.1	
VII	1	20.5	23.5
	2	29.3	
	3	21	
VIII	1	16.5	16.4
	2	18.6	
	3	14.54	

Tabla 38: Resultados del ensayo de resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión realizado sobre los BTC producidos en fábrica. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie	ID	Profundidad de erosión (mm)	
		d_i	d_{med}
III	1	2.0	0.67
	2	0.0	
	3	0.0	
IV	1	51.0	40.17
	2	38.0	
	3	31.5	
V	1	9.0	8.33
	2	9.0	
	3	7.0	
VI	1	43.0	44.00
	2	39.0	
	3	50.0	
VII	1	1.5	2.83
	2	3.0	
	3	4.0	
VIII	1	29.0	13.50
	2	4.5	
	3	7.0	

Serie	Probetas cilíndricas	BTC producidos en fábrica
III		
IV		
V		
VI		
VII		
VIII		

Figura 122: Resultados del ensayo de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión sobre probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica. **Fuente:** Elaboración propia.

IV.5 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

IV.5.a Trabajo de campo

En la Tabla 39 se muestra el consumo energético asociado a cada etapa del proceso productivo de los BTC, los cuales se obtuvieron tras relevar la planta de producción de la empresa Mobak, con una producción media de 36 lotes por día, contando cada uno de ellos con 55 BTC. La asignación del consumo energético por unidad elemental (1 BTC) se realizó dividiendo el consumo eléctrico de todo el lote por 55.

Tabla 39: Energía consumida en cada etapa del proceso de fabricación de 1 BTC. **Fuente:** Elaboración propia.

Consumo energético por operación	Potencia del equipo (KW)	Tiempo de uso por lote (min)	Energía consumida por lote (MJ)	Energía consumida por BTC (KJ)
Desterronado	2.0	8.5	1.020	0.0185
Tamizado	1.1	8.5	0.561	0.0102
Mezclado	5.5	7.0	2.310	0.0420
Cinta transportadora corta	0.8	7.0	0.336	0.0061
Cinta transportadora larga	1.1	7.0	0.462	0.0084
Prensado hidráulico	3.0	8.5	1.530	0.0278
Curado	0.4	-	-	0.0024
			TOTAL	0.1155

IV.5.b Impacto ambiental

Para expresar los resultados del análisis de ciclo de vida realizado sobre las 12 series de BTC mediante el software Simapro se utilizó el método de la EPD 2018 (Environmental Product Declarations) que cuantifica el impacto ambiental en 8 niveles de impacto, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 40.

Tabla 40: Resultados del inventario de impactos de las diferentes series de BTC. **Fuente:** Elaboración propia.

Serie	Acidificación del suelo y el agua (kg SO ₂ eq)	Eutrofización del agua (kg PO ₄ eq)	Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	Oxidación fotoquímica (kg NMVOC)	Consumo de minerales (kg Sb eq)	Consumo de combustibles Fósiles (MJ)	Consumo de agua (m ³ eq)	Deterioro de la Capa de ozono (kg CFC-11 eq)
Cal 0% (I)	0,227	0,047	0,042	0,243	0,00011	0,6	0,109	0,000006
Cal 2,5%	0,353	0,068	0,135	0,362	0,00012	10708,0	0,110	0,000011
Cal 5%	0,479	0,089	0,228	0,482	0,00014	15278,0	0,112	0,000017
Cal 10% (IV)	0,731	0,130	0,415	0,722	0,00016	24419,0	0,116	0,000028
Cal 15%	0,983	0,171	0,601	0,961	0,00019	33559,0	0,120	0,000039
Cal 20%	1,235	0,213	0,787	1,200	0,00022	42700,0	0,124	0,000050
Cto 0% (II)	0,249	0,054	0,045	0,265	0,00013	0,7	0,158	0,000006
Cto 2,5%	0,452	0,102	0,138	0,444	0,00017	10228,0	0,161	0,000009
Cto 5%	0,654	0,150	0,231	0,624	0,00021	13924,0	0,164	0,000011
Cto 10% (III)	1,059	0,245	0,416	0,983	0,00029	21316,0	0,170	0,000017
Cto 15%	1,038	0,346	0,492	1,017	0,00036	16293,0	0,177	0,000014
Cto 20%	1,870	0,436	0,787	1,700	0,00045	36100,0	0,182	0,000027
P. Ladrillo 3% (VII)	0,890	0,218	0,305	0,823	0,00031	19298,2	0,165	0,000021
P. Ladrillo 5% (VIII)	0,859	0,218	0,247	0,835	0,00034	18272,1	0,171	0,000020
Puzolana 3% (V)	0,958	0,237	0,314	0,910	0,00034	20730,7	0,171	0,000023
Puzolana 5% (VI)	0,735	0,183	0,230	0,684	0,00029	15620,1	0,161	0,000017

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

V.1 SOBRE LOS MATERIALES EMPLEADOS

V.1.a Tierra y arena

Los resultados de los ensayos granulométricos realizados sobre muestras de tierra, identificada por sus límites de Átterberg como una “arcilla de baja plasticidad” indican un contenido de 54% de limo, 32% de arcilla y 14% de arena fina. Asimismo, las semicuantificaciones realizadas por DRX confirman que, desde el punto de vista mineralógico, el mineral preponderante es el cuarzo (65%), seguido por filosilicatos (arcillas) (25%) y feldespatos (9%) (Tabla 21). Los difractogramas de los agregados orientados de la fracción arcillosa de la tierra (Figura 49) indican que los filosilicatos presentes en ella son illita, caolinita y esmectita.

Los resultados obtenidos confirman que las características de la tierra empleada son compatibles con las del loess pampeano (depósito eólico polvoriento que data principalmente del período frío del Pleistoceno) correspondiente, desde el punto de vista Geológico–Ambiental, a la “Pampa Norte” (Figura 123) cuya columna estratigráfica, según estudios realizados por Kröhling & Orfeo [160], está compuesta por más de 40 m de loess. El limo forma la mayor parte de la mezcla sedimentaria del loess de esta región, con 65% en promedio. La arcilla oscila entre 14 y 21%; la arena entre 2 y 23% y los coloides entre 5 y 7%. La composición mineralógica de la arena muy fina del loess está dominada por cuarzo y feldespatos, con illita y caolinitas en menor proporción que las illitas como minerales de arcillas presentes [161].

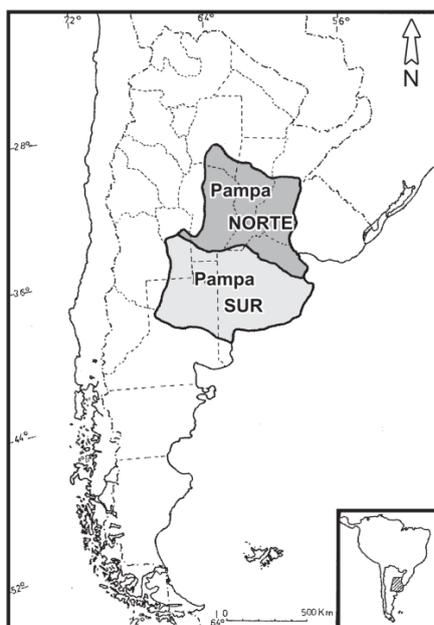


Figura 123: Ubicación de la Pampa Norte y Pampa Sur. **Fuente:** Kröhling & Iriondo [161].

La baja retracción observada en la tierra (4.31%) es compatible con la baja plasticidad, advertida por los límites de Átterberg. Debe resaltarse además que la tierra empleada no evidencia presencia de sales solubles y su contenido de materia orgánica, inferior al 3%, es aceptable para su utilización como material en diversas técnicas de construcción con tierra [162].

Como puede apreciarse en la Figura 124, desde el punto de vista de sus propiedades plásticas, la tierra cumple con las características mínimas recomendadas para ser empleada en la fabricación de BTC [11,41,152,163]; sin embargo, esto no sucede con su distribución granulométrica.

Para “corregir” la distribución granulométrica de la tierra, cuyo contenido de partículas de tamaño arena es mínimo, fue necesario incorporar arena. En la Figura 125 se expone como, con porcentajes de reemplazo del 30% y 50% de arena por tierra, la distribución granulométrica de la mezcla cumple las recomendaciones internacionales.

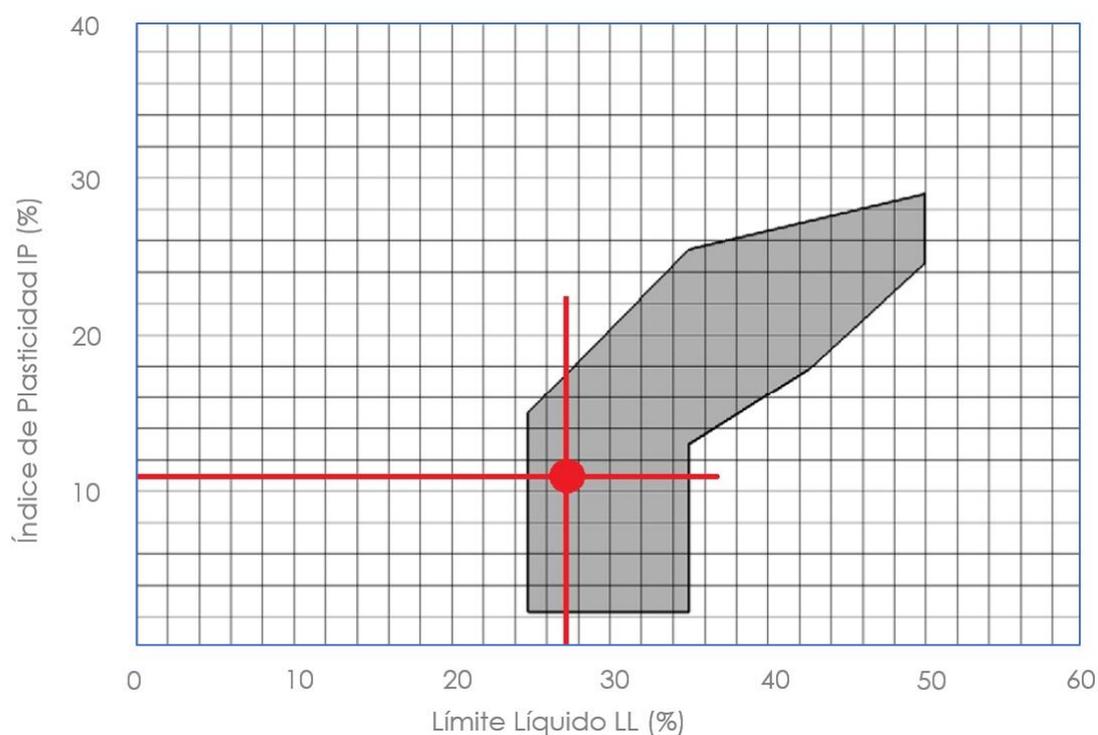


Figura 124: En rojo los límites de Átterberg de la tierra en estudio y en gris la región de límites recomendados por la norma española UNE-EN 41410:2008 [152]. **Fuente:** Elaboración propia en base a lo recomendado por la norma española UNE-EN 41410:2008 [152].

Granulometría recomendada para BTC

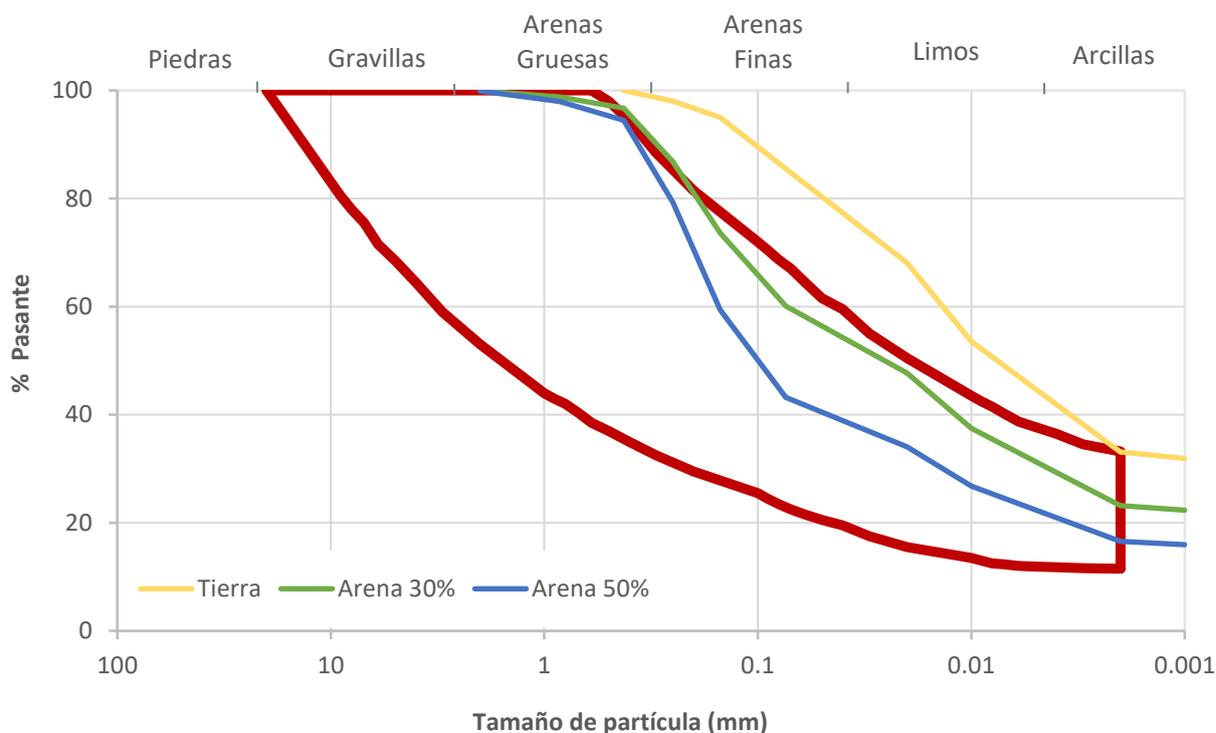


Figura 125: Distribución granulométrica de las mezclas con diferente proporción tierra/Arena: Tierra sola (Tierra), 70% de tierra + 30% de arena (Arena 30%) y 50% tierra + 50% arena (Arena 50%). **Fuente:** Elaboración propia a partir de los entornos definidos por la norma española UNE EN 41410 [152]

Es importante mencionar que, a pesar de generarse un material cuya distribución granulométrica se encuentra dentro de los rangos aceptables, en la Figura 125 se evidencia la ausencia de partículas de tamaño superior a 0.25 mm (arena gruesa) ya que la arena empleada en la corrección granulométrica, posee una distribución de tamaños extremadamente uniforme: más del 90% de sus partículas poseen un tamaño comprendido entre 0.5 y 0.1 mm (Figura 44).

Además de la uniformidad de tamaños, las imágenes FESEM revelan la ausencia de aristas y formas angulares en sus granos, presentado todos ellos una forma redondeada (Figura 50). Desde el punto de vista mineralógico sus granos están constituidos prácticamente en su totalidad (95% en peso) por cuarzo, contando únicamente con un 1 % de arcillas (Tabla 21). A pesar de la elevada resistencia del cuarzo, la uniformidad de tamaños y forma redondeada de los granos de arena no es óptima para la fabricación de BTC ya que estas características minimizan la compacidad y “trabazón” de la mezcla.

De este modo, en función de las características de los suelos naturales empleados en esta investigación se observa que ni la tierra ni la arena propios de la región santafesina son los indicados para la fabricación de BTC [11,41] por el elevado contenido de limos y ausencia de partículas de tamaño arena en la tierra; y por la forma redondeada y tamaño pequeño y uniforme de las partículas de arena. Sin embargo, al combinar ambos materiales puede generarse un material apto para la fabricación de BTC.

V.1.b Estabilizantes

Como puede apreciarse en la Tabla 18, el contenido en peso de hidróxido de calcio (componente activo) de la cal Blancaley es inferior al 30%, lo cual la hizo inviable para su utilización en la estabilización de probetas y bloques. Este bajo contenido de Ca(OH)_2 puede deberse en parte a las condiciones de almacenamiento inadecuadas tanto en la fábrica de producción como en los depósitos de los corralones que la comercializan, ya que el 22% de su peso es carbonato de calcio (cal "endurecida"). Sin embargo, su color grisáceo (Figura 30) y elevado contenido de impurezas de esta cal (48% el peso) confirman que su calidad es inadecuada para emplearla como estabilizante.

Los ensayos realizados sobre las muestras de cal Andina indican que su contenido de hidróxido de calcio oscila entre el 67 y 74% según el método empleado en su determinación (titulación con ácido clorhídrico o DRX). Estos valores, a pesar de mostrar un elevado contenido de impurezas, se asemejan a los contenidos de Ca(OH)_2 de las cales comerciales empleadas por diversos autores en la estabilización de BTC y suelos arcillosos, lo cual se expone en la Tabla 41. Debe remarcarse el elevado contenido de carbonato de calcio, cercano al 30 %, presente en la cal Andina (ver difractogramas de la Figura 48) lo cual puede atribuirse a un deficiente proceso de calcinación de la piedra caliza y a un inadecuado almacenamiento de la cal hidratada favoreciendo su carbonatación.

En lo que respecta al cemento Portland tipo CPC 40, empleado únicamente en la estabilización de la serie de control (serie III), como puede apreciarse en la Tabla 22, en su composición mineralógica, además de encontrarse los componentes propios del clinker (silicatos bicálcico y tricálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico) y el yeso (sulfato de calcio hidratado), se advierte la presencia de calcita (o carbonato de calcio), posiblemente atribuido a la incorporación de filler calcáreo en el cemento. Esto se corresponde con la composición típica

de los cementos Portland compuestos “CPC” estipulados por la norma IRAM 50.000:2019, para los cuales se permite la adición de entre un 6 y un 35% de adiciones puzolánicas, cenizas volantes de alto horno o filler calcáreo [133].

Tabla 41: Contenidos de Ca(OH)_2 en las cales comerciales empleadas para la estabilización de BTC y suelos arcillosos por diversos investigadores. **Fuente:** Elaboración propia.

Autor	Año	Ref.	Tipo de cal	Contenido de Ca(OH)_2 (% peso)
Laguna	2011	[27]	Cal hidráulica	53.00
González-López	2018	[29]	Cal aérea hidratada	77.02
			Cal hidráulica	59.11
Elert <i>et al</i>	2018	[151]	Cal dolomítica	54.21
Azañón y Nieto	2017	[164]	Cal aérea hidratada	66.50
Alavez-Ramirez <i>et al</i>	2012	[165]	Cal aérea hidratada	68.83
Khemissa y Mahamedi	2014	[166]	Cal aérea hidratada	83.33
De Windt <i>et al</i>	2014	[167]	Cal aérea hidratada	94.00

Finalmente, tanto la densidad aparente como el tamaño medio de las partículas de cal, de entre 1 y 9 μm (Figura 54), son inferiores a las del cemento Portland, con tamaños de partículas superiores a las 10 μm (Figura 55) y una densidad aparente de 900.8 kg/m^3 .

V.1.c Adiciones minerales

V.1.c.i Composición química

En la Tabla 20 se expresa la composición química de las adiciones minerales empleadas. En ella puede advertirse que la puzolana contiene 7 veces más Si que Al, mientras que la relación Si/Al del polvo de ladrillo es de 5.04.

Si se compara el contenido de Si y Al de las adiciones en estudio con los informados por otros investigadores expresados como óxidos (Tabla 42), puede advertirse que únicamente las cenizas de cáscara de arroz, cenizas de bagazo de caña de azúcar y el humo de sílice poseen un contenido mayor de Si que el polvo de ladrillo y la puzolana empleadas en esta investigación; y que el resto de las adiciones posee un mayor contenido de Al. Sin embargo, el elevado contenido de Si y Al no es condición suficiente para garantizar la capacidad puzolánica (capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio para formar S-C-H Y A-C-H) de las adiciones minerales ya que estos deben

encontrarse en fase amorfa dado que la actividad puzolánica es inversamente proporcional al grado de cristalinidad de un material [168].

Tabla 42: Contenido de Al_2O_3 y SiO_2 de diferentes adiciones minerales empleadas en la estabilización de BTC y suelos arcillosos, o como reemplazo parcial de morteros de cal y cemento. **Fuente:** Elaboración propia.

Autor	Año	Ref.	Adición mineral	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)
Laguna	2011	[27]	Ceniza de cáscara de arroz	No indica	90.0
Lima <i>et al</i>	2012	[39]	Ceniza de bagazo de caña de azúcar	1.9	96.2
			Cenizas volantes	21.8	48.8
Guilarducci	2018	[22]	Cenizas volantes	22.58	48.11
Arizzi y Cultrone	2018	[149]	Metacaolin	45.26	50.8
			Residuos catalíticos	42.57	46.35
Alavez-Ramírez <i>et al</i>	2012	[165]	Ceniza de caña de azúcar	9.92	51.66
Navrátilová y Rovnaníková	2016	[168]	Polvo de ladrillo	15.25	58.87
Bediako	2018	[34]	Polvo de ladrillo	14.7	67.35
Donatello <i>et al</i>	2010	[148]	Cenizas de lodos cloacales (ISSA)	11.2	35.8
			Cenizas volantes (FA)	27.1	53.8
			Metacaolin (MK)	34.0	59.5
			Humo de sílice (SF)	0.5	98

La Figura 48 muestra los resultados de los análisis de difracción de rayos X (XRD) de muestras de polvo desorientado de los materiales empleados en esta investigación. En dicha figura puede apreciarse como el polvo de ladrillo contiene cuarzo, feldespato (ortoclasa y anortita) y pequeñas cantidades de illita y hematita. En el caso de la Puzolana, el elevado número de señales de baja intensidad entre los 20° y 33° del difractograma indica la presencia de una cantidad significativa de fases amorfas, además de la presencia de illita, cuarzo, cristobalita y pequeñas cantidades de feldespato (albita).

V.1.c.ii Características superficiales

En lo que respecta a las características superficiales de las adiciones, las imágenes FESEM (Figura 52 y Figura 53) son coherentes con las mediciones del área superficial de cada una de ellas (Tabla 23), mostrando una menor porosidad y mayor tamaño de partículas para la puzolana en comparación con el polvo de ladrillo. Como se muestra en la Figura 52, el tamaño promedio de

las partículas de polvo de ladrillo de aproximadamente 20 μm , es menor que el de las partículas de puzolana, de entre 25 y 100 μm .

Las características superficiales son de gran relevancia, ya que la reactividad de un material puzolánico además de estar ligada a su composición química y grado de cristalización, también depende del tamaño de sus partículas y su área superficial: las partículas más pequeñas tienen una superficie específica más alta y, en consecuencia, una mayor reactividad [148].

V.1.c.iii Capacidad puzolánica

Los resultados del método físico para evaluar la capacidad puzolánica del polvo de ladrillo y la puzolana (Figura 64) indican que, para porcentajes de reemplazo de cal por adiciones del 10%, no se evidencian modificaciones significativas de la resistencia a compresión respecto de los morteros de cal. Para porcentajes de reemplazo del 30% se advierte un significativo incremento en la resistencia para las 2 adiciones minerales en estudio, del 192% y 170% para el polvo de ladrillo y puzolana, respectivamente. Finalmente, para porcentajes de reemplazo del 50%, las probetas con polvo de ladrillo registraron una resistencia del 170% respecto a las series de control –sensiblemente menor que la serie con un porcentaje de reemplazo del 30%- y las probetas con puzolana tuvieron un incremento en su resistencia del 335%.

La diferencia entre las resistencias de las series con 50% de puzolana y 50% de polvo de ladrillo puede atribuirse a la significativa diferencia de agua empleada en el moldeo de las probetas ya que, para lograr una consistencia similar de los morteros en estado húmedo (requisito del método de ensayo), dadas las diferencias de porosidad y retención de agua de cada adición mineral, fue necesario emplear relaciones agua/cal distintas en cada serie; lo cual no sucedió durante el moldeo de las series con un 30% de reemplazo (Tabla 7).

Los resultados obtenidos por esta prueba, dada la variabilidad en el contenido de agua empleados durante el moldeo de las probetas, solo permiten inferir que, para porcentajes de reemplazo de cal por adiciones del 30 y 50%, el desarrollo de las reacciones puzolánicas entre ambas adiciones minerales en estudio y la cal (formación de S-C-H y A-C-H) es tal que genera un incremento significativo en la resistencia a compresión de los morteros a edades avanzadas (28 días).

Los resultados de los ensayos realizados para determinar el potencial puzolánico de las adiciones por vía química a partir del consumo de Ca^{2+} libre, indican que ambas poseen una capacidad puzolánica similar, consumiendo el polvo de ladrillo y la puzolana el 55% y el 59% del Ca^{2+} disponible tras 16 días de prueba, respectivamente.

Asimismo, estos ensayos demostraron que la capacidad puzolánica de las 2 adiciones minerales es significativamente menor que la del metacaolín, el cual, luego de 16 días de prueba consumió el 89.2% del Ca^{2+} disponible (Figura 61).

Al evaluar la capacidad puzolánica de la tierra, se observó que ésta es muy reactiva con el Ca^{2+} en solución, pero el consumo de Ca^{2+} aumentó a una tasa menor que en el caso de las adiciones minerales en estudio. Este rápido consumo inicial puede atribuirse al intercambio de cationes entre Ca^{2+} en solución y Na^+ en la capa intermedia de esmectita [38,169,170].

Si se compara el consumo de Ca^{2+} del polvo de ladrillo y puzolana en estudio con el de las cenizas volantes evaluadas por Guillarducci [22], específicamente la serie con un tamaño de partículas inferior a $75 \mu\text{m}$ (mismo tamaño que las adiciones evaluadas en esta tesis) se advierte como, luego de 7 días de ensayo, las cenizas volantes consumieron el 68.95 % del calcio disponible y a los 28 días el 78.44 %, mientras que la “tierra diatomea” analizada por Rosenhurt *et al* [171] consumió luego de 28 días el 88 % del calcio en solución. Del mismo modo, las 4 adiciones minerales estudiadas por Donatello *et al* [148] (metacaolín, cenizas de lodos cloacales, cenizas volantes y humo de sílice) consumen a los 7 días de ensayo, más del 90% del Ca^{2+} disponible.

Finalmente, puede afirmarse que tanto el polvo de ladrillo como la puzolana poseen capacidades puzolánicas; sin embargo, éstas son menores que las de otras adiciones ampliamente estudiadas en el contexto local, nacional e internacional.

V.2 SOBRE LA CONFECCIÓN DE PROBETAS

V.2.a Proceso de dosificación y compresión de las prensas comercialmente disponibles

Como ya fue mencionado en el capítulo III, durante el desarrollo de esta investigación se confeccionaron tres tipos de probetas de ensayo: BTC producidos en laboratorio con densidad controlada, probetas cilíndricas con densidad controlada y BTC producidos en la fábrica de la empresa Eco3 Ingeniería. Esta situación responde a uno de los parámetros fundamentales en la

fabricación de BTC: el proceso de compresión puede realizarse por deformación controlada regulando la *tasa de compresión*⁷, o por presión controlada, estableciendo la fuerza de compresión entregada. En el primero de los casos, se define la altura inicial y final del molde en el cual se introduce el mortero de tierra, entregándose la fuerza que sea necesaria, variable en función de la cantidad de material incorporado dentro del molde, su compacidad y contenido de humedad. En el segundo de los casos, se coloca el mortero dentro del molde y se comprime hasta alcanzar una fuerza de compresión estipulada, pudiendo generarse bloques de diferente altura⁸ si la cantidad de material incorporada dentro del molde, su compacidad o humedad no son exactamente iguales.

Las prensas comerciales específicamente diseñadas para la fabricación de BTC, tanto manuales como automáticas, trabajan por deformación controlada, definiendo una altura inicial - profundidad de molde donde se aloja el mortero de tierra antes de ser comprimido- y el “recorrido” del pistón de compresión, definiéndose por la diferencia entre ambas distancias la altura final del BTC. Asimismo, en este tipo de prensas la carga del mortero dentro del molde se realiza por volumen, incorporando la cantidad necesaria de material empleando un cajón de volumen definido, el cual se recarga por gravedad mediante una tolva; este proceso para una prensa de accionamiento manual -exactamente igual para prensas de accionamiento semi automático y similar pero automatizado para prensas completamente automáticas- puede apreciarse en la Figura 126.

De esta manera, la correcta fabricación de BTC requiere de la determinación del punto de equilibrio entre la máxima fuerza de compresión entregada por la prensa, su tasa de compresión y el volumen del molde de carga. De no alcanzarse este equilibrio, pueden fabricarse bloques de tamaño uniforme (porque la prensa realizó todo el recorrido durante la compresión) pero comprimidos con una fuerza insuficiente, o bloques fabricados con la máxima fuerza de compresión entregada por la prensa, pero con alturas diferentes (mayores) a las nominales. Para alcanzar este punto de equilibrio, gran parte de las prensas comercialmente disponibles cuentan

⁷ Es la relación entre la distancia comprimida (recorrido del pistón) y la dimensión final del bloque una vez finalizado el proceso de compresión, expresada en porcentaje.

⁸ La gran mayoría de las prensas comerciales, tanto manuales como automáticas, comprimen de manera vertical, de manera tal que la única dimensión que varía durante el proceso de compresión es la altura del bloque.

con un sistema que permite modificar la capacidad volumétrica del molde, subiendo el asiento del émbolo en prensas de accionamiento manual (Figura 127) o incorporando suplementos en la parte superior del cilindro de compresión (Figura 128).

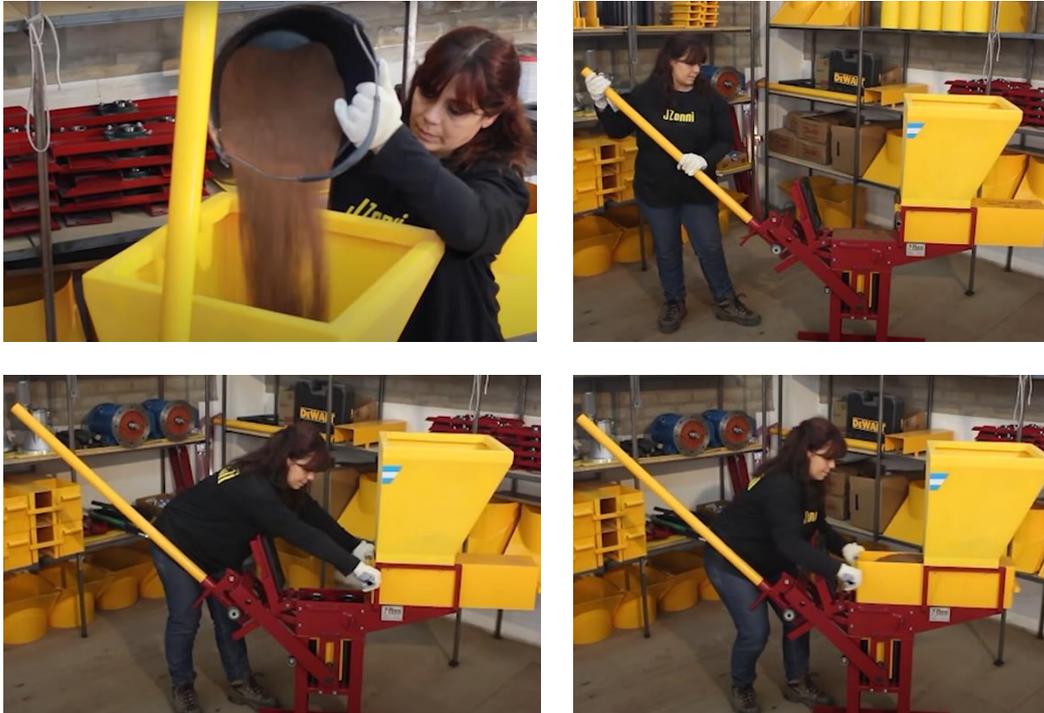


Figura 126: Proceso de carga por volumen de una prensa manual. **Fuente:** Elaboración propia a partir de la página web del fabricante de prensas Julián Zonni [172].



Figura 127: Tornillo que permite subir o bajar el asiento del émbolo y modificar el volumen del molde de una prensa de accionamiento manual. **Fuente:** Elaboración propia a partir de la página web del fabricante de prensas Julián Zonni [172].



Figura 128: Suplementación con planchuelas metálicas en la parte superior del cilindro de compresión para modificar el volumen del molde de una prensa semiautomática. **Fuente:** Elaboración propia a partir de la página web del fabricante de prensas Julián Zonni [172].

V.2.b Probetas de ensayo empleadas en las investigaciones de BTC

La producción de BTC por deformación controlada, sistema empleado por gran parte de las prensas comercialmente disponibles en Argentina garantiza que, al trabajar de manera adecuada y regular el volumen inicial del molde acorde a la compacidad y contenido de humedad del mortero de tierra empleado, los bloques producidos tengan una altura uniforme entre sí, minimizando la posibilidad de producir bloques de mayor o menor altura, lo cual eliminaría una de sus principales virtudes: la regularidad de forma, la cual permite acelerar de manera significativa la construcción de muros con BTC y minimizar el espesor del mortero entre hiladas. Sin embargo, para determinados fines investigativos, emplear BTC producidos de esta manera puede resultar inconveniente.

Si el objetivo es investigar el desarrollo de propiedades específicas en función de la energía de compactación aplicada durante la fabricación de los bloques, la utilización de una prensa comercial no es apropiado ya que éstas trabajan por deformación controlada. De esta manera, investigadores nacionales tales como Galíndez [52,173] y Arias *et al* [90] e internacionales tales como Cedrik [71], Mansour *et al* [92,174] y González-López *et al* [29] han moldeado y trabajado con probetas confeccionadas por prensas hidráulicas de laboratorio, comúnmente empleadas para determinar la resistencia a compresión y flexión de elementos constructivos, y moldes especialmente diseñados para tal fin, de forma cilíndrica o prismática. Sus investigaciones han demostrado la correlación entre la fuerza de compresión empleada durante la fabricación de los bloques, el aumento en su resistencia a compresión y del coeficiente de conductividad térmica,

y la disminución de la porosidad, absorción de agua y del coeficiente de absorción de sonido; propiedades directamente dependientes de la densidad de un material.

Otros investigadores han realizado ensayos sobre BTC adquiridos directamente en emprendimientos comerciales, sin intervención alguna en el proceso de fabricación de los BTC. Tal es el caso de Cabrera *et al* [53] y Ruiz *et al* [93], cuyo objetivo era evaluar el efecto de la preparación de los bloques para ser ensayados a compresión y flexión en sus respectivas resistencias, y Cid-Falceto [70], quien estudió la durabilidad de los BTC ante diferentes métodos de ensayo.

Aquellos investigadores cuyo objetivo principal fue evaluar determinadas propiedades en función de modificaciones en la dosificación de los BTC o en la adición de algún estabilizante, con excepción de Ouedraogo *et al.* [99] quien moldeó probetas prismáticas con una prensa de ensayos, han trabajado sobre BTC producidos con prensas manuales de accionamiento manual tipo Cinva Ram [28,69,98,100,106] o Tersta Ram [39,107] (con sistema de compresión accionado mediante la rotación de unas manivelas), semiautomático [81,175] y automático [91].

De acuerdo con el análisis anterior, en la Tabla 43 se exponen de manera resumida los diversos tipos de probetas empleadas para la evaluación de las propiedades de los BTC y las prensas empleadas para su fabricación.

Tabla 43: Probetas de ensayo empleadas por diversos investigadores y equipo empleado para su moldeo.

Fuente: Elaboración propia.

Autor	Año	Ref.	Probeta	Dimensiones (cm)	Prensa utilizada
Ouedraogo <i>et al</i>	2020	[99]	Prismas	15 x 15 x 5	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
			Cilindros	d = 5; h = 5	
Cabrera <i>et al</i>	2020	[53]	BTC	25 x 12.6 x 6.2	Prensa manual tipo "Cinva Ram"
			BTC	30 x 15 x 7.5	Prensa hidráulica semiautomática
			BTC	30 x 15 x 7	Prensa hidráulica automática
Malkanthi <i>et al</i>	2020	[31]	Cubos	15 x 15 x 15	Compactación manual (dinámica) en 3 capas
Cabrera <i>et al</i>	2020	[175]	BTC	25 x 12.5 x 6.5	Prensa hidráulica semiautomática "Eco brava"
Barbero <i>et al</i>	2020	[98]	BTC	29.4 x 14.1 x 9.7	Prensa manual tipo "Cinva Ram"
Sitton <i>et al</i>	2018	[91]	BTC	35 x 18 x 10	Prensa hidráulica automática Earth Blox BP714

González-López <i>et al</i>	2018	[29]	BTC	29 x 14 x 7	Prensa manual Cinva Ram
			Prismas	20 x 4 x 3	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
Ruiz <i>et al</i>	2018	[93]	BTC	29 x 14 x 7	Prensa hidráulica semiautomática
Arias <i>et al</i>	2017	[90]	Cilindros	d = 6; h = 6	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
Mansour <i>et al</i>	2017	[92]	Discos	d = 10; h = 2	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
			Prismas	7 x 7 x 28	
Nagaraj <i>et al</i>	2017	[106]	BTC	30.5 x 14.5 x 10.0	Prensa manual tipo "Cinva Ram"
Mansour <i>et al</i>	2016	[174]	Prismas	28 x 7 x 7	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
Silva <i>et al</i>	2015	[107]	BTC	28 X 14 X 10	Prensa manual TERSTA-RAM
Vázquez <i>et al</i>	2015	[81]	BTC	25 x 12.5 x 6.5	Prensa hidráulica semiautomática
Nagaraj <i>et al</i>	2014	[28]	BTC	30.5 x 14.5 x 10	Prensa manual tipo "Cinva Ram"
Goux Gutierrez <i>et al</i>	2014	[100]	BTC	29 x 14 x 7	Prensa manual Cinva Ram
Cédric	2012	[71]	Cilindros	d = 10; h = 10	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
			Prismas	30 x 15 x 8	
Lima <i>et al</i>	2012	[39]	BTC	24 x 11 x 5	Prensa manual TERSTA-RAM
Cid-Falceto	2012	[70]	BTC	30.6 x 16.6 x 10.3	Prensa hidráulica automática
				29 x 14.5 x 9.5	Prensa hidráulica semi automática
				29.5 x 14 x 9	Prensa hidráulica automática
				30 x 14.5 x 10.5	Prensa hidráulica semi automática
Aranda Jiménez	2009	[69]	BTC	29 x 14 x 7	Prensa manual tipo "Cinva Ram"
Galíndez	2007	[173]	Cilindros ^(p)	d = 10.16; h = 11.64	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
Galíndez	2007	[52]	Cilindros ^(p)	d = 10.16; h = 11.64	Prensa hidráulica para ensayos de laboratorio
			BTC	15 x 30 x h _{variable}	Prensa manual de accionamiento hidráulico

Este estudio bibliográfico permitió fundamentar la decisión de confeccionar tres tipos de probetas para el desarrollo de esta investigación:

1. Con el objetivo de poner a punto los equipos de producción y ensayo y de evaluar la resistencia de los BTC producidos con diferentes proporciones de tierra y arena y diversos contenidos de cal y cemento, se fabricaron BTC en laboratorio sin el empleo de la tolva y cajón dosificador de la prensa (Figura 126), incorporándose el material previamente

pesado directamente dentro del molde; garantizando de esta manera la densidad uniforme de los BTC.

2. Ya con intenciones de evaluar el efecto del reemplazo parcial de cal por adiciones minerales en las propiedades de los BTC, se produjeron 8 series de probetas cilíndricas manteniendo constante la tasa de compresión empleada y la densidad final de cada probeta.
3. Finalmente, para evaluar el efecto producido por el “salto de escala” en las propiedades de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales, se fabricaron en la planta de producción de la empresa Eco3 Ingeniería 15 BTC por cada una de las 8 dosificaciones empleadas para la confección de las probetas cilíndricas. A diferencia de los BTC producidos por laboratorio, en este caso la mezcla húmeda fue transportada por cintas transportadoras a la tolva de almacenamiento de la prensa, la cual a su vez alimenta el cajón dosificador que llena (por volumen) el molde de la prensa.

V.3 SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS PROBETAS

En la Figura 129, conformada a partir de las imágenes expuestas desde la Figura 65 a la Figura 76 del Capítulo I, se presentan imágenes FESEM de muestras estabilizadas con cemento, puzolana y polvo de ladrillo. En ellas se observa la presencia de etringita en forma de agujas, con un tamaño de entre 1 y 2 micras. Se ha reportado que la formación de esta fase mineral es rápida [38], lo cual puede advertirse en las muestras estabilizadas con polvo de ladrillo y puzolana con un período de reacción de tan solo 5 horas (Figura 129.a y Figura 129.b), siendo más evidente su presencia en muestras con un período de reacción de 28 días (Figura 129.c y Figura 129.d). Se detectaron además cantidades abundantes de esta fase en muestras curadas durante 28 días que contenían cemento Portland (Figura 129.e), mientras que las muestras que contenían cal mostraron cristales de calcita con la típica morfología de escalenoedro (Figura 129.f), lo cual puede atribuirse al elevado contenido de esta fase mineral en la cal empleada para la estabilización (Tabla 21), ya que ninguno de los otros materiales posee este componente.

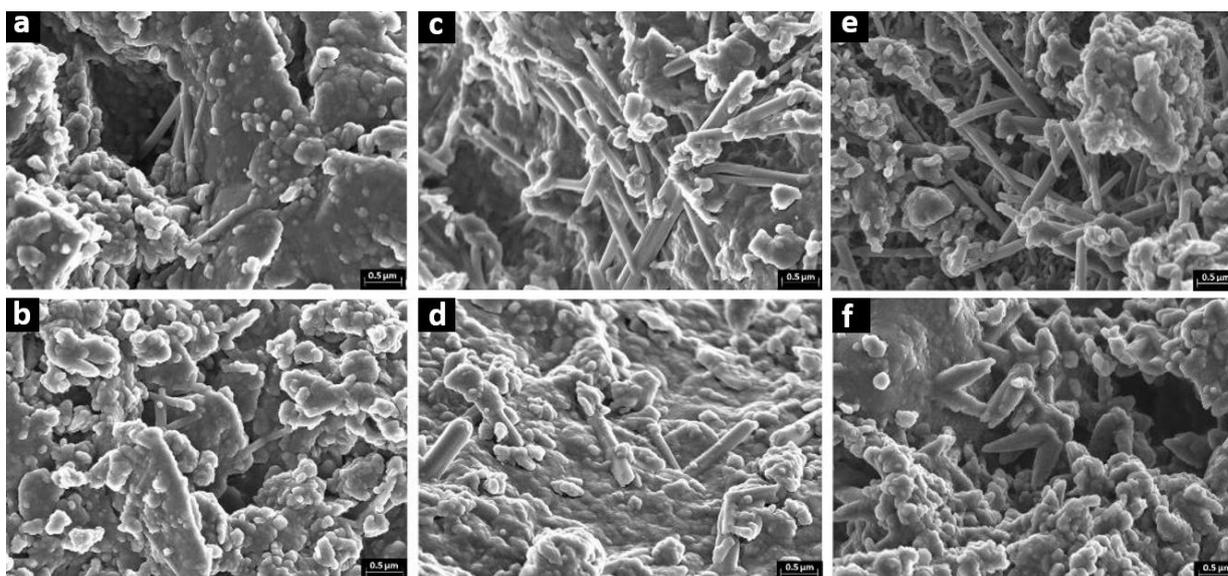


Figura 129: Imágenes FESEM de muestras de tierra estabilizadas con **a)** 3% de puzolana y 7% de cal luego de 5 hs de reacción **b)** 3% de polvo de ladrillo y 7% de cal luego de 5 hs de reacción **c)** 3% de puzolana y 7% de cal luego de 28 días de reacción **d)** 3% de polvo de ladrillo y 7% de cal luego de 28 días de reacción, **e)** 10% de cemento Portland luego de 28 días de reacción y **f)** 10% de cal luego de 28 días de reacción. **Fuente:** Elaboración propia.

Los patrones TEM-AEM y SAED corroboraron que las "varillas" presentes en las muestras estabilizadas con cal y adiciones minerales corresponden a etringita (Figura 84) a pesar que el contenido de esta fase esté por debajo del límite de detección del DRX. Debe tenerse en cuenta que la etringita, compuesto con elevado grado de cristalinidad, parece haber sufrido amorfización tras el impacto del haz de electrones.

Las imágenes TEM de muestras de BTC estabilizados con 3% de polvo de ladrillo (Figura 83) y 3% de puzolana (Figura 84) y curados durante 28 días muestran fases con características morfológicas y composición acordes con la presencia de S-(A)-C-H poco cristalino, a menudo ubicado en el borde exterior de las partículas de tierra. Sin embargo, como resultado de la pequeña cantidad de estas fases poco cristalinas [151] solo fueron detectadas por DRX en el caso de la muestra de la serie III, que contenía 10% de cemento Portland (Figura 130).

Ing. Santiago Cabrera

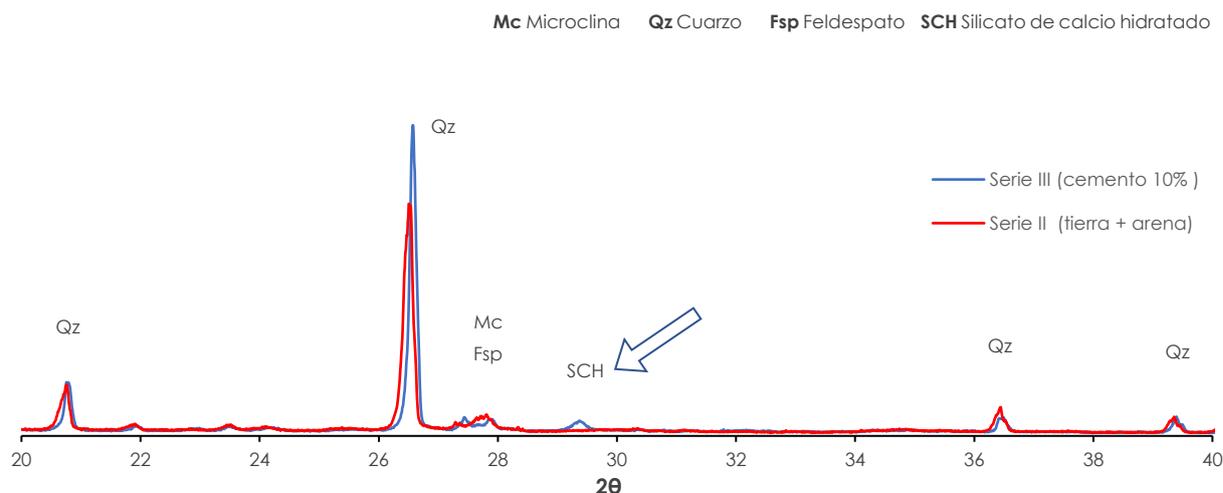


Figura 130: Patrones de difracción DRX de una muestra de suelo y arena (serie II) y de la muestra con 10% de cemento Portland (serie III) luego de 28 días de reacción, mostrando en esta última la presencia de CSH.

Fuente: Elaboración propia.

En los difractogramas de las series estabilizadas con cal y adiciones minerales, condensados en la Figura 131 puede apreciarse claramente como, las únicas fases identificadas, además de los minerales propios de la tierra y la arena, son calcita y Portlandita, esta última no evidenciada en las series IV y VI, posiblemente por haberse carbonatado en su totalidad. Podría asumirse la presencia de S-C-H y A-C-H, aunque esto no puede asegurarse ya que sus picos característicos, a pesar de encontrarse en los difractogramas de las diferentes series estabilizadas, se solapan con los picos característicos de la calcita, Portlandita, cuarzo y albita.

Finalmente, a pesar de que la puzolana presente contenidos de azufre significativos y que en los microanálisis realizados durante el SEM y TEM evidenciaron la presencia de Etringita, ésta no pudo ser detectada por DRX.

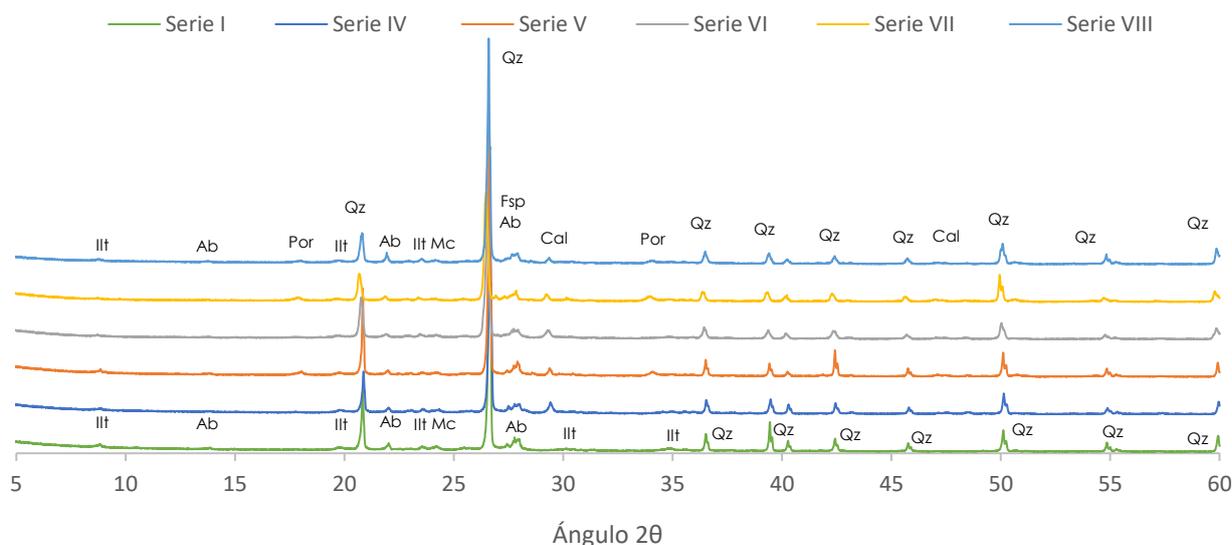


Figura 131: Patrones de difracción DRX de la serie de comparación estabilizada con cal (serie IV) y las series estabilizadas con puzolana (V y VI) y polvo de ladrillo (VII y VIII). **Fuente.** Elaboración propia.

V.4 SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

V.4.a BTC producidos en laboratorio

Las series de BTC producidas en laboratorio se confeccionaron con una finalidad específica: evaluar el efecto de la incorporación de diferentes porcentajes de cal y cemento en la estabilización de BTC producidos con la tierra y arena de la región, y el efecto de las diferentes relaciones tierra/arena del mortero en la resistencia final de los bloques. Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados sobre estas series de bloques (Figura 109 y Figura 110) permitieron obtener los siguientes resultados:

1. La relación tierra/arena para las probetas sin estabilizante y con un 10 % de cal no tiene incidencia desde el punto de vista estadístico en la resistencia a compresión de los BTC. Sin embargo, para las probetas estabilizadas con un 10% de cemento se advierte un incremento en la resistencia en función del mayor contenido de material grueso, generándose la mayor resistencia para las series con una relación tierra/arena igual a 1.
2. Sobre los BTC estabilizados con cal, puede afirmarse desde el punto de vista estadístico, con un 95% de confianza, que su resistencia media a compresión, independientemente del porcentaje de cal utilizado, es estadísticamente igual a la resistencia media a compresión de la serie de BTC sin estabilizar.

- La resistencia de los BTC con cemento se vio sumamente influenciada por el porcentaje de estabilizante empleado: las series y bloques estabilizadas con 2.5 y 5% de cemento presentaron, desde el punto de vista estadístico, una resistencia media a compresión sin diferencia significativa entre sí, e igual a la de los BTC sin estabilizante alguno. Los bloques con 10 y 15% de cemento presentaron resistencias estadísticamente iguales entre sí y superiores a las de sus homólogos con bajos contenidos de cemento, mientras que la serie estabilizada con 20% de cemento presentó una resistencia media a compresión superior a la de las demás series.

En la Figura 132 se muestra de manera gráfica la variación de resistencias en función del porcentaje de estabilizante empleado en la fabricación de los BTC, advirtiéndose de manera clara la independencia de la resistencia en función del contenido de cal y su elevada dependencia en función del contenido de cemento Portland empleado.

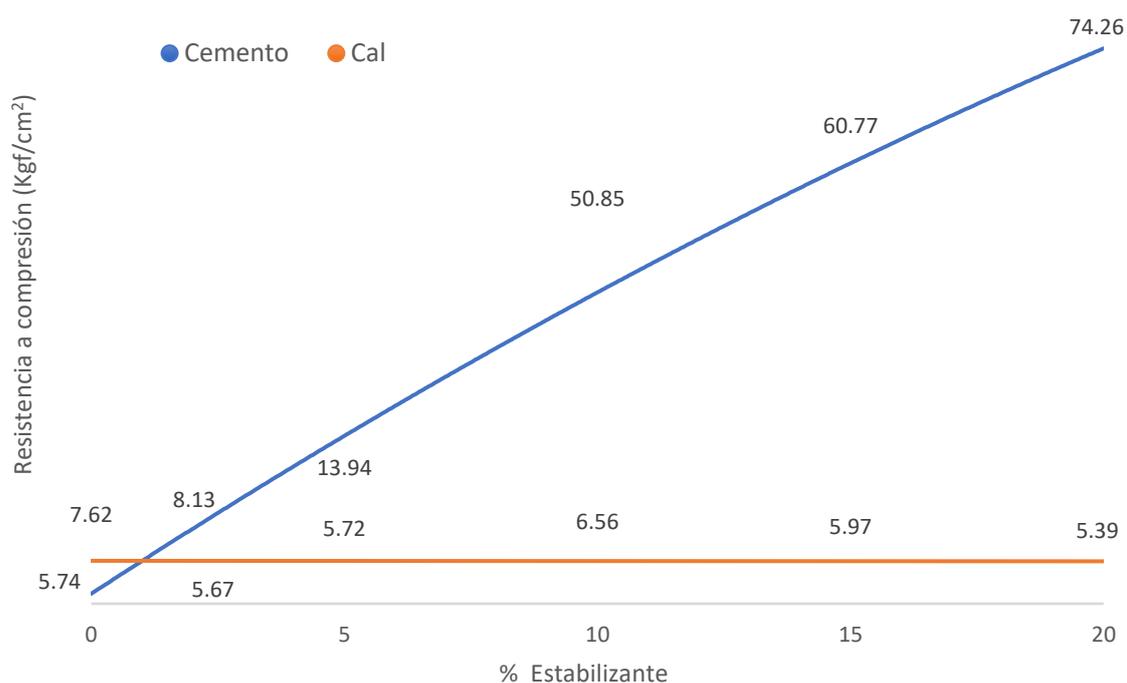


Figura 132: Curvas de interpolación de resistencia a compresión vs. porcentaje de cal o cemento empleados en la estabilización de los BTC. **Fuente:** Elaboración propia.

Estos resultados coinciden con los obtenidos en investigaciones previas realizadas en el Laboratorio de Geotecnia de la UTN FRSF en las cuales se ha demostrado que la resistencia a compresión de los BTC producidos con tierra local y estabilizados con cal es significativamente menor que la de sus homólogos estabilizados con igual proporción de cemento [30], lo cual a su

vez, coincide y refuerza los resultados obtenidos por diferentes investigadores [27,29,99]. Sin embargo, el hecho de que la resistencia de los BTC estabilizados con cal sea similar a la resistencia de los BTC sin estabilizar indica que, al menos durante los primeros 28 días de reacción, no se están desarrollando las reacciones puzolánicas esperadas entre los minerales arcillosos de la tierra y el hidróxido de calcio de la cal.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos sobre la relación tierra/arena en la resistencia de los BTC son el principal fundamento para las dosificaciones de las 4 series de control de las probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica:

- Series I y II: sin estabilizante y con 30% y 50% de arena respectivamente.
- Serie III: Su relación tierra/arena se corresponde con la de la serie II, pero estabilizada con un 10 % de cemento, por haberse demostrado que esta relación tierra/arena maximiza la resistencia a compresión de los BTC con cemento.
- La serie IV: su relación tierra/arena se corresponde con la de la serie I, pero estabilizada con un 10% de cal.

V.4.b Densidad de las probetas

En la Figura 102 y Figura 103 se exponen las densidades medias de cada una de las series de probetas. En ellas puede apreciarse claramente como la densidad media de las series de probetas cilíndricas no presenta desde el punto de vista estadístico una variabilidad significativa, oscilando entre los 1600 kg/m³ y 1650 kg/m³. Por el contrario, la densidad de los BTC producidos en fábrica presentan dos particularidades respecto a la densidad de las series de probetas cilíndricas:

- La diferencia entre las densidades de los BTC correspondientes a una misma serie es mayor que la diferencia entre las densidades de sus homólogas cilíndricas. Esto puede advertirse comparando serie por serie las desviaciones estándar de las probetas cilíndricas y los BTC producidos en fábrica.
- Las densidades medias de cada serie de BTC producidos en fábrica son estadísticamente diferentes entre sí, siendo las series I, II y IV las de menor densidad, y las series V y VII las de mayor densidad.

En la Figura 133, construida a partir de la Figura 102 y Figura 103, se muestra de manera clara lo explicado en el apartado anterior. En ella, la altura de la barra de error de cada columna representa la desviación estándar de la densidad de cada serie.

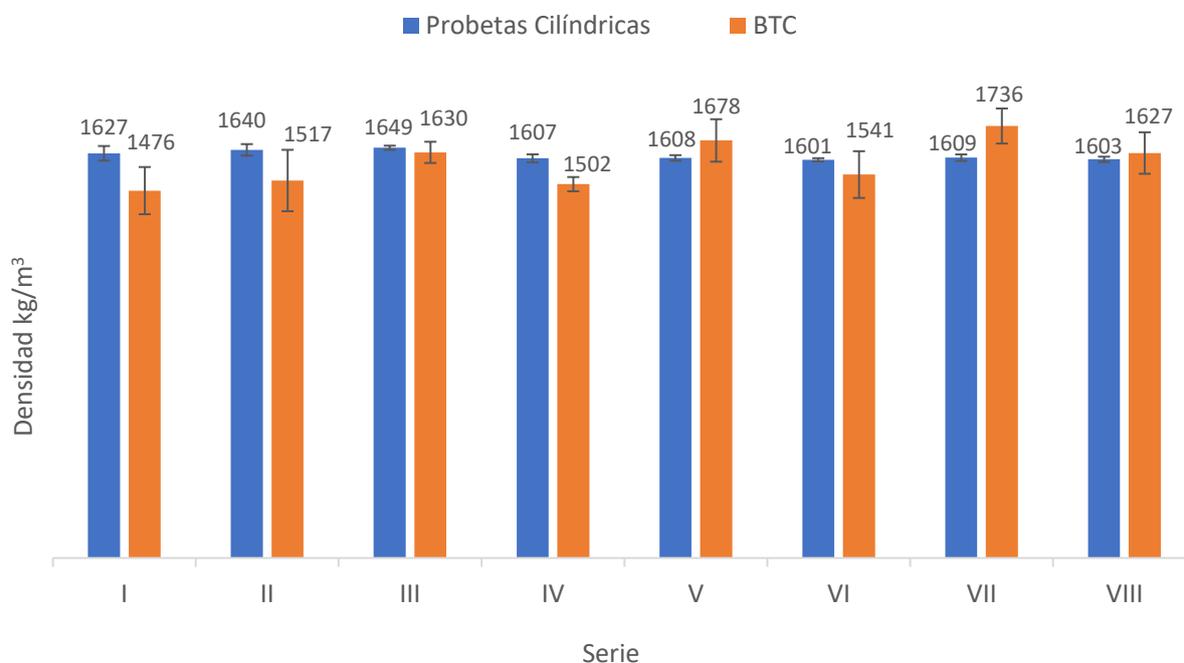


Figura 133: Densidad media de cada una de las series de probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica.
Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento puede atribuirse a las diferentes condiciones de moldeo empleadas, ya que las probetas cilíndricas se confeccionaron en laboratorio respetando de manera rigurosa - por pesado- la cantidad de material incorporada dentro del molde y la tasa de compresión aplicada, mientras que, por las particularidades del equipo de prensado empleado para la fabricación de los BTC en fábrica, el mortero se introdujo dentro del molde de la prensa “por volumen”, tal como se indica en la Figura 126.

V.4.c Resistencia a compresión

En la Figura 134 se expone de manera conjunta la resistencia media a compresión seca de las probetas cilíndricas moldeadas en laboratorio y los BTC producidos en fábrica. En ella se advierte como la resistencia a compresión de las probetas estabilizadas con 10% de cemento (serie III) supera por más de 6 veces la de resistencia de las muestras de control (serie II), mientras que las resistencias medias a compresión de las series estabilizados con cal son inferiores a la resistencia

de la serie de control correspondiente a su relación tierra/arena (serie I); ambos patrones pueden apreciarse tanto en las probetas cilíndricas como en los BTC producidos en fábrica.

Se observa también que las resistencias medias a compresión seca de las series de probetas cilíndricas estabilizadas con cal y adiciones minerales (series IV a VIII) no presentan diferencias estadísticas entre sí, siendo inferiores a la resistencia media a compresión de la serie de control (serie II). Esto no se aprecia en los resultados de los ensayos realizados sobre los BTC producidos en fábrica, en los cuales puede advertirse una mayor resistencia a compresión de las series V y VII. Esta variación en los resultados de resistencia a compresión de las probetas cilíndricas y los BTC producidos en fábrica puede atribuirse a la diferencia en las densidades de moldeo de cada serie de BTC.

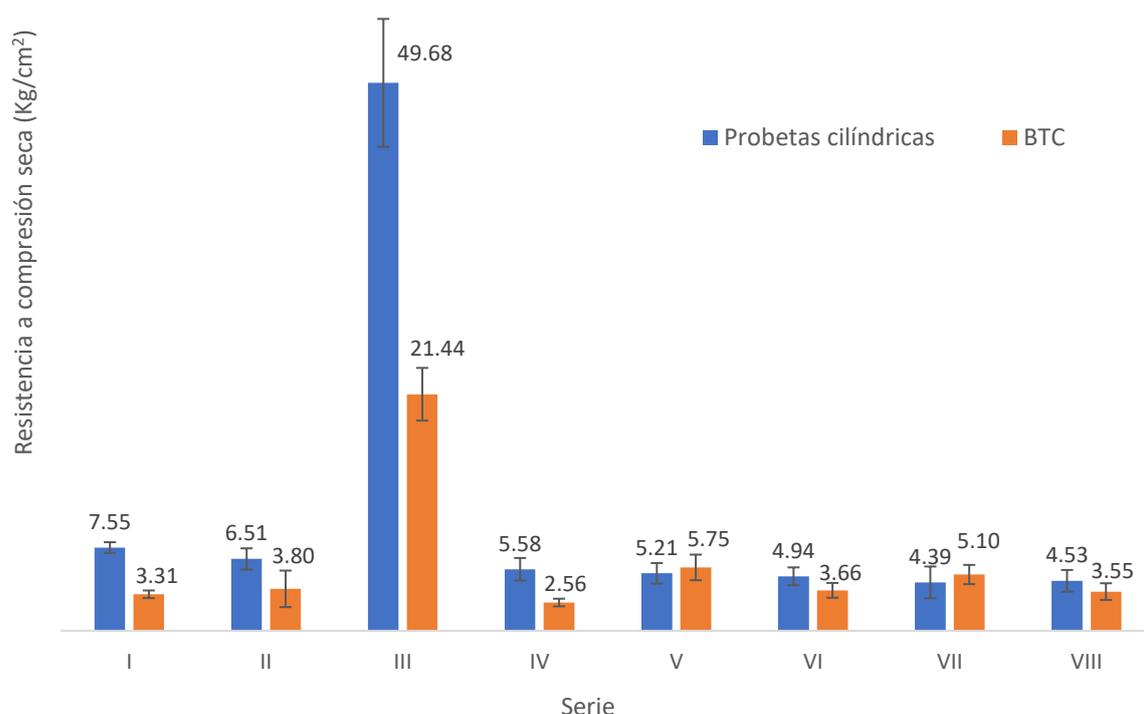


Figura 134: Resistencia a compresión seca de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio y los BTC producidos en fábrica. **Fuente:** Elaboración propia.

En lo que respecta a la resistencia a compresión saturada (Figura 135), con excepción de las muestras estabilizadas con cemento (serie III), la relación de resistencias entre las probetas secas y saturadas es inferior a 0.5; sin embargo, se resalta el hecho de que, sin la utilización de estabilizantes minerales (series I y II) no fue posible determinar la resistencia a compresión de las probetas saturadas por su “desintegración” dentro del recipiente con agua.

Las comparaciones mencionadas fueron confirmadas por el análisis de ANOVA realizado con una significancia del 95%, empleando para ello el software estadístico MiniTab.

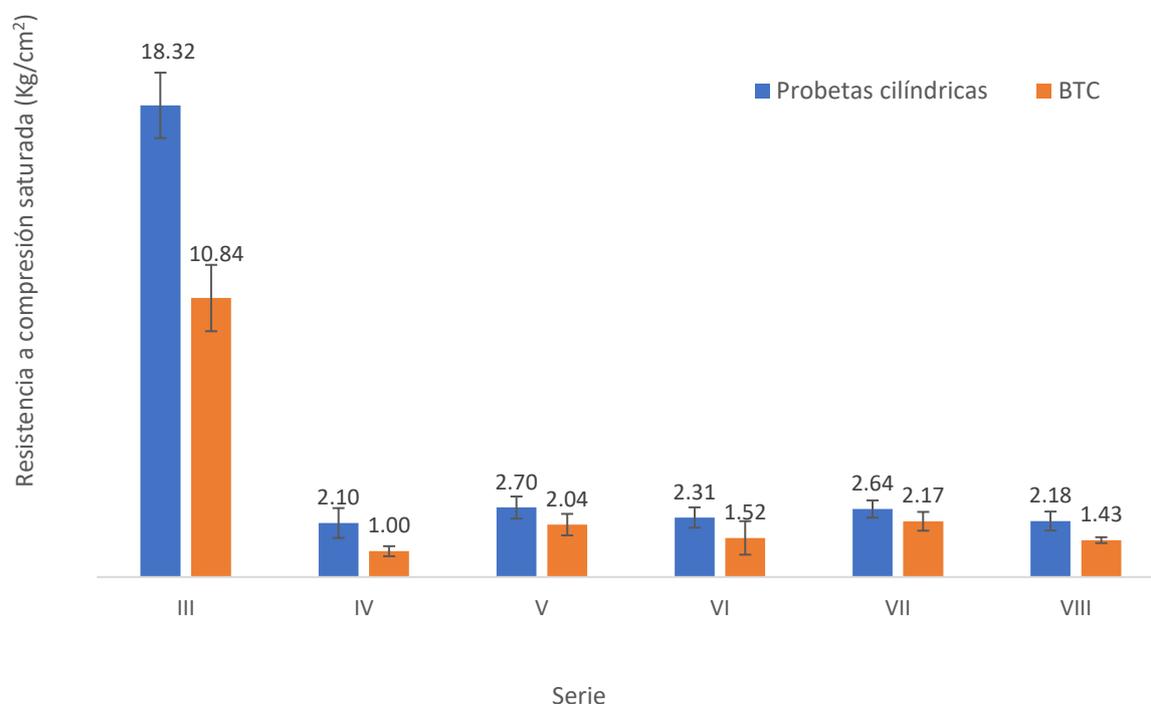


Figura 135: Resistencia a compresión saturada de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio y los BTC producidos en fábrica. **Fuente:** Elaboración propia.

Debe remarcarse el hecho de que la estabilización de las muestras con cal y adiciones minerales, a pesar de no generar incrementos en su resistencia a compresión, permite que éstos sean expuestos al agua e incluso sumergidos. Esto se debe en gran medida al intercambio entre los iones de los espacios interlaminares de las arcillas y el Ca^{2+} [166,170].

Finalmente, en Tabla 44 se resumen las diferentes resistencias a compresión seca y saturada de BTC determinadas y publicadas por diversos investigadores. Comparando las resistencias de las diferentes series de probetas y BTC confeccionados y ensayados para esta investigación con los valores de esta Tabla, puede apreciarse cómo la resistencia de los BTC y probetas estabilizados con cal y adiciones minerales es significativamente baja, siendo incluso inferior a la menor resistencia reportada en la Tabla 44 por Lima *et al* [39]; e inferior a la resistencia requerida para adobes, de entre 10, 12 o 15 kgf/cm² según la normativa consultada [123,176,177]. Desde este punto de vista, únicamente los bloques y probetas estabilizados con cemento Portland (10% o más) presentan valores acordes a los requeridos por la normativa argentina para la construcción

de muros portantes con ladrillo, de 40 o 50 kgf/cm² [54,56], y similares a los valores publicados por otros autores [39,52,53,98,99].

Tabla 44: Resistencia a compresión seca y saturada de BTC determinada por diferentes investigadores.

Fuente: Elaboración propia.

Autor	Año	Ref.	Estabilizante	Resistencia a compresión (Kgf/cm ²)
Ouedraogo <i>et al</i>	2020	[99]	2% cemento	48
			4% cemento	58
			2% cal	34
			4% cal	33
Cabrera <i>et al</i>	2020	[53]	8% cemento + 4% cal	11
			10% cemento + 5% cal	34
			10% cemento + 0% cal	39
Barbero <i>et al</i>	2020	[98]	3% cal	35
			6% cal	44
			9% cal	40
			12% cal	46
Sitton <i>et al</i>	2018	[91]	9% cemento	143
			11% cemento	151
González-López <i>et al</i>	2018	[29]	15% cemento	118
			15% cal	20
Ruiz <i>et al</i>	2018	[93]	6% cemento	97
Arias <i>et al</i>	2017	[90]	11% cemento	100
Nagaraj <i>et al</i>	2017	[106]	6% cemento + 2% cal	44 (saturada)
			8% cemento + 2% cal	58 (saturada)
Nagaraj <i>et al</i>	2014	[28]	8% cemento	72 (saturada)
			6% cemento + 2% cal	43 (saturada)
			4% cemento + 4% cal	49 (saturada)
Goux Gutierrez <i>et al</i>	2014	[100]	8% cemento	78
			7% cal	74
Lima <i>et al</i>	2012	[39]	6% cemento	7
			6% cemento + 8% cenizas	15
			12% cemento	31
			12% cemento + 8% cenizas	29

Laguna	2011		5% cal + 8% ceniza de arroz	58
			5% cemento + 8% cenizas	99
Galíndez	2007	[52]	10% cemento	38

V.4.d Absorción de agua

En Figura 136 se condensan los resultados de los ensayos de absorción de agua por capilaridad e inmersión realizados sobre las probetas cilíndricas moldeadas en laboratorio y los BTC producidos en fábrica. En ella puede apreciarse cómo, en la absorción de agua por capilaridad de las probetas cilíndricas no existe diferencia estadística entre los porcentajes medios de absorción de las diferentes series ensayadas, siendo todos ellos inferiores al 15% (límite estipulado por la norma india IS 1725 [153], la más estricta en este aspecto), lo cual no sucede con los resultados de los BTC producidos en fábrica, cuya variabilidad en la densidad del material genera una marcada dispersión en los resultados de este ensayo. Sin embargo, en los resultados de absorción de agua por capilaridad, tanto de probetas cilíndricas como de los BTC producidos en fábrica, la absorción media de agua de la serie V, estabilizada con 3% de puzolanas es, desde el punto de vista estadístico, menor a la del resto de las series; lo cual puede indicar la formación de compuestos hidratados (S-(A)-C-H gel) que disminuyen la porosidad del material [151].

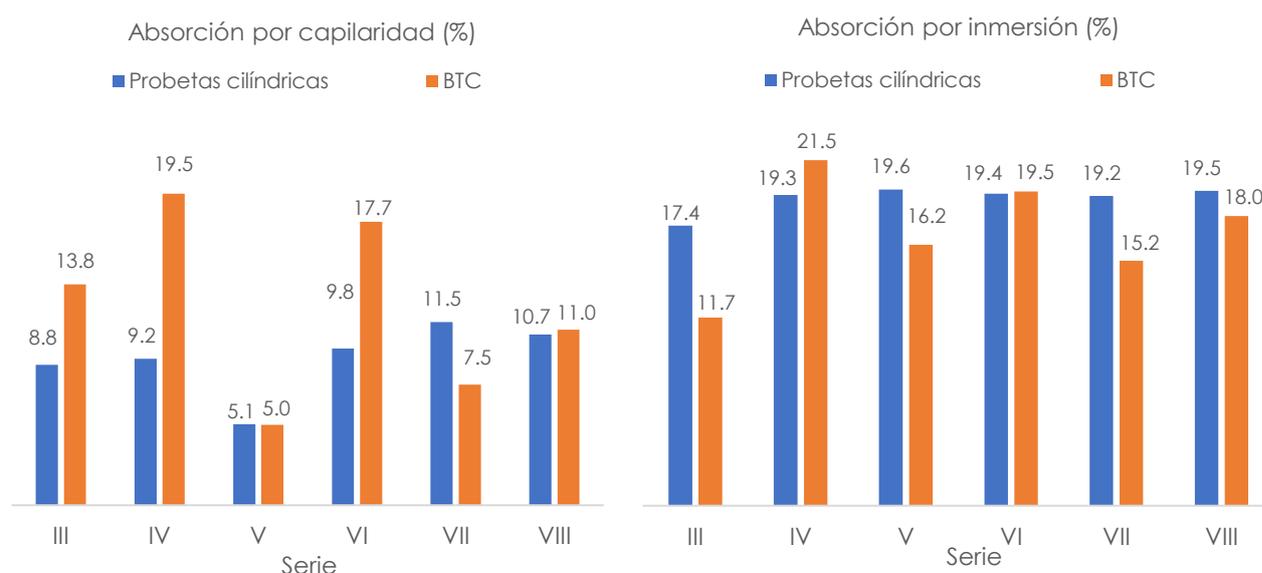


Figura 136: Absorción de agua por capilaridad (izquierda) e inmersión (derecha) de las probetas cilíndricas producidas en laboratorio y de los BTC producidos en fábrica. **Fuente:** Elaboración propia.

Al analizar los resultados del ensayo de absorción de agua por inmersión puede apreciarse como, en todas las series ensayadas, la absorción media de agua es superior a la absorción media de agua por capilaridad. Este fenómeno es esperable ya que en el ensayo de inmersión se busca que todos los poros de las probetas se llenen de agua, mientras que, en el ensayo de absorción por capilaridad, esto no sucede. Se aprecia además que los porcentajes de absorción media de las diferentes series de probetas cilíndricas, con excepción de la serie III estabilizada con cemento Portland, son estadísticamente similares entre sí; situación que ocurre en las series de BTC producidos en fábrica, cuya variabilidad en la densidad de las series incide de manera directa en la absorción de agua.

V.4.e Erosión húmeda

Al evaluar los resultados del ensayo de resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión (Figura 122) puede apreciarse una diferencia en el comportamiento de las series de probetas cilíndricas comparado con el de las series de BTC producidos en fábrica. Las probetas cilíndricas de control estabilizadas con 10% de cal y 10% de cemento no experimentaron un deterioro significativo por la acción del agua, mientras que las series estabilizadas con diferentes porcentajes de polvo de ladrillo y puzolana presentan niveles de erosión considerables. Por el contrario, en las series de BTC producidos en fábrica, aquellas estabilizadas con 10% de cemento, 3% de puzolana y 7% de cal (serie V) y 3% de polvo de ladrillo y 7% de cal (serie VII) no se vieron afectadas por el ensayo de erosión, mientras que la serie de control estabilizada únicamente con 10% de cal y aquellas con 5% de reemplazo de cal por puzolana (serie VI) y polvo de ladrillo (serie VIII) se vieron afectados por este ensayo.

Los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por Galíndez [52,173], Arias *et al* [90], Cedrik [71], Mansour *et al* [92,174] y González-López *et al* [29] han demostrado la existencia de una correlación entre la fuerza de compresión empleada durante la fabricación de los bloques, su densidad aparente, su resistencia a compresión y su absorción de agua, demostrando que a mayor energía de compactación, se obtienen bloques de mayor densidad aparente y menor porosidad, lo cual mejora de manera significativa la resistencia mecánica de los bloques y disminuye su absorción de agua. Este fenómeno explica la diferencia en el comportamiento de las series de BTC producidas en fábrica y estabilizadas con cal y adiciones minerales (series IV, V, VI, VII y VIII), cuyas propiedades no se corresponden con las de las probetas cilíndricas moldeadas

en laboratorio ni se encuentran condicionadas -al menos de manera evidente- al contenido de cal o de adiciones minerales empleados en su estabilización. Sin embargo, al graficar en un sistema de ejes cartesianos las diferentes propiedades de los BTC en estado húmedo (resistencia a compresión saturada, resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión, absorción de agua por capilaridad y absorción de agua por inmersión) en función de la densidad media de cada serie, y no de su dosificación (como se ha realizado en los análisis anteriores), puede apreciarse de manera clara la dependencia lineal entre estas cuatro propiedades con la densidad aparente de cada serie.

Este análisis se expresa de manera gráfica en la Figura 137, donde se ajustan los diferentes puntos con una recta de regresión lineal, calculando además el coeficiente de ajuste R^2 de cada correlación. Este coeficiente mide la calidad de ajuste del modelo y representa la proporción de la variación total en los valores de Y (resistencia a compresión) explicada por la relación lineal con los valores de X (esbeltez de las probetas). En todos los casos puede apreciarse cómo el valor de este coeficiente es superior a 0.85, lo cual es indicio de un buen modelo de ajuste [155].

Esta situación permite pensar que, para mejorar la comprensión sobre el efecto del reemplazo parcial de cal por polvo de ladrillo y puzolana, resultaría conveniente analizar los resultados de los ensayos mecánicos realizados sobre las diferentes series de probetas cilíndricas por el mayor control en sus condiciones de producción y su densidad homogénea en todas las series.

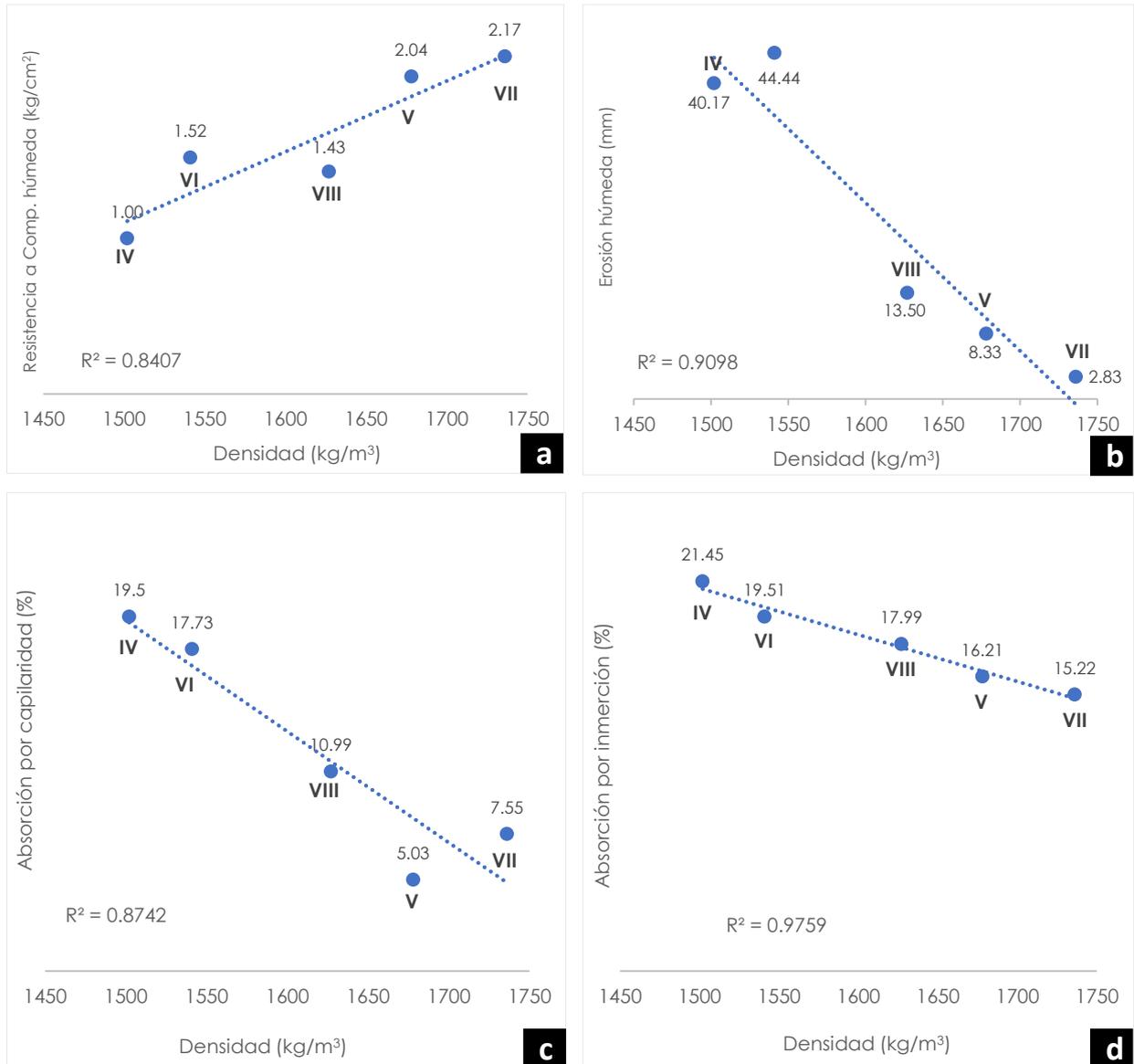


Figura 137: a) Resistencia a compresión húmeda **b)** Erosión húmeda por pulverizado de agua a presión, **c)** absorción de agua por capilaridad y **d)** absorción de agua por inmersión de las series de BTC producidos en fábrica estabilizados con cal y adiciones minerales en función de su densidad. **Fuente:** Elaboración propia.

V.5 SOBRE EL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS BTC

En la Figura 138 se exponen de manera gráfica los resultados expresados en la Tabla 40, obtenidos tras realizar el análisis de inventario de los BTC estabilizados con diferentes porcentajes de cal o cemento Portland. El porcentaje asociado a cada columna de esta Figura se referencia al máximo valor de impacto de las diferentes categorías, correspondiente a los BTC estabilizados con 20% de cal o cemento, según la categoría en cuestión.

En lo que respecta a la acidificación del suelo y el agua (1), la eutrofización del agua (2), la oxidación fotoquímica (4) y el consumo de minerales (5), el factor de impacto aumenta con el contenido de estabilizante, siendo en todos los casos mayor para los BTC estabilizados con cemento Portland. Por el contrario, el consumo de combustibles fósiles (6) y el deterioro de la capa de ozono (8) son significativamente mayores para los BTC estabilizados con cal que con cemento, lo cual no sucede con las emanaciones de CO₂ equivalente (3), las cuales, a pesar de aumentar significativamente con el contenido del estabilizante empleado, se mantienen prácticamente igual para ambos estabilizantes.

Es interesante remarcar cómo el consumo de agua (7) es superior para los BTC estabilizados con cemento que para aquellos estabilizados con cal. Sin embargo, como puede apreciarse en el primer cuadrante de la Figura 138, esto no se debe al tipo de estabilizante empleado sino, al mayor contenido de arena empleado en la fabricación de estos bloques, ya que su extracción demanda grandes volúmenes de agua en comparación con los requeridos en la explotación de una cantera de tierra.

En la Figura 139 se comparan de manera gráfica los impactos de los BTC estabilizados con cal y diferentes contenidos de puzolana y polvo de ladrillo. En ella puede apreciarse de manera clara como, los únicos ítems que disminuyen su impacto por el reemplazo parcial de cal por polvo de ladrillo o puzolana son el calentamiento global (3), el consumo de combustibles fósiles (6) y el deterioro de la capa de ozono (8). Por el contrario, la eutrofización del agua (2), el consumo de minerales (5) y el consumo de agua (7) aumentan de manera significativa con el reemplazo parcial de cal por las adiciones en estudio.

Finalmente, los resultados muestran que, para todos los ítems evaluados, el impacto asociado a la utilización de polvo de ladrillo en comparación con el impacto vinculado a la utilización de puzolana es, para ambos porcentajes de reemplazo, mayor. Esto puede deberse a la forma en la cual el software SimaPro computa al polvo de ladrillo la energía (y consecuente impacto ambiental) necesaria para la fabricación de los ladrillos y luego su molienda.

Ing. Santiago Cabrera

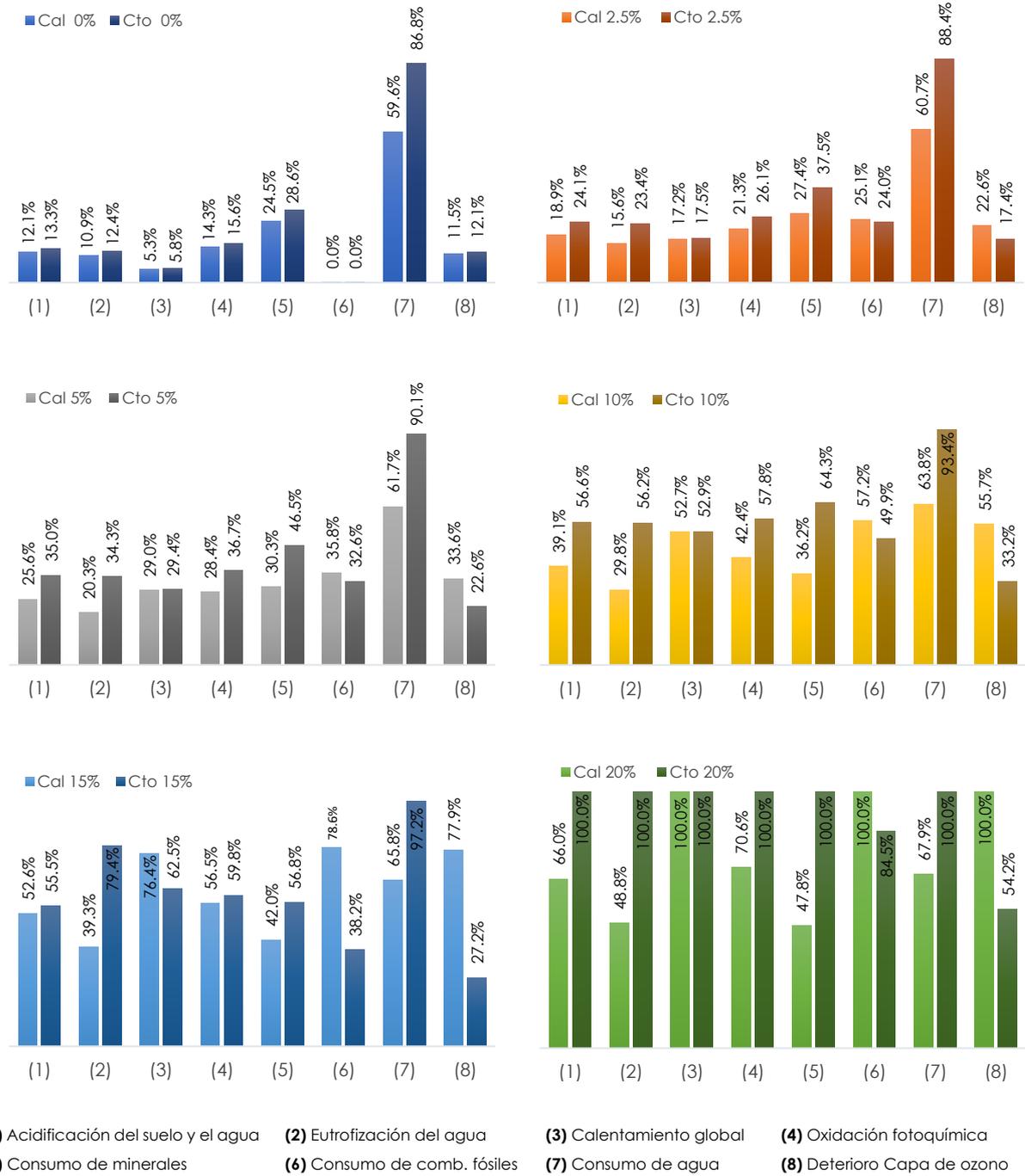


Figura 138: Comparación entre los diferentes factores de impacto de BTC estabilizados con cal y cemento en diversas proporciones (en peso). **Fuente:** Elaboración propia.

Ing. Santiago Cabrera

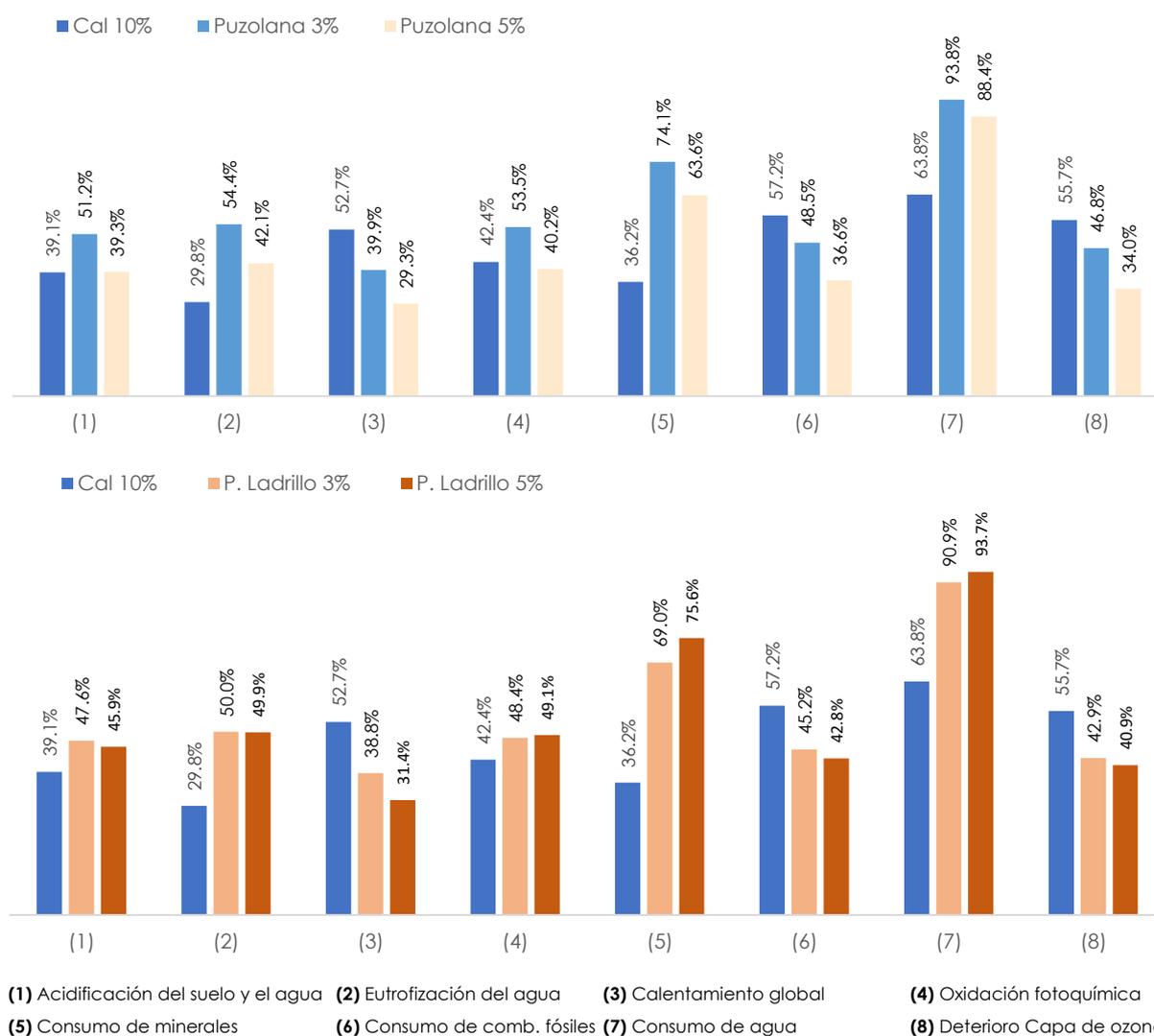


Figura 139: Comparación entre los diferentes factores de impacto de BTC con 10% de cal y diferentes contenidos de polvo de ladrillo y puzolana. **Fuente:** Elaboración propia.

La comparación de la energía incorporada por los BTC determinada según investigaciones de diferentes autores debe considerar que, además de las diferentes materias primas y procesos de fabricación analizados, cada estudio posee objetivos, alcances e inventarios diferentes. Pese a ello, la elaboración de la Tabla 45 permite comparar la energía incorporada por las diferentes series de BTC analizadas en este trabajo –entre 0.65 y 4,27 MJ/ BTC, según la cantidad y tipo de estabilizante empleado- con los resultados publicados por otros investigadores. Al comparar resultados, considerando que hay materiales y metodologías diferentes, en algunos casos los valores son similares a los obtenidos por esta investigación, particularmente los publicados por Vázquez Éspi [45].

Tabla 45: Energía incorporada durante la fabricación de un BTC publicada por diferentes autores.

Fuente: Elaboración propia.

Autores	Año	Ref.	Energía Incorporada (MJ/BTC)	Estabilizante empelado
Vázquez Éspi	2001	[45]	0.18 - 5.76	Diferentes proporciones de cemento Portland
Roux Gutiérrez <i>et al</i>	2016	[46]	7.62	7% de cal aérea hidratada
Fernandes <i>et al</i>	2019	[178]	3.94	6.5 % de cal hidráulica
Esta investigación	2022	-	0.65 - 4,27	Diferentes proporciones de cal y cemento Portland

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

VI.1 CONCLUSIONES PARCIALES

VI.1.a Desarrollo de la tecnología del BTC en Argentina

El BTC cuenta en la actualidad con un grado de desarrollo tecnológico creciente en el país, encontrándose localizado en diferentes ciudades y regiones, siendo el Centro y Noroeste argentino donde en las últimas dos décadas, se han registrado los avances de mayor consolidación. Los últimos desarrollos están logrando impactar en el conocimiento y difusión de esta tecnología dentro de la construcción civil, con particular énfasis en la construcción de viviendas, en base a diferentes tipologías de residencias, al mayor número de fabricantes de bloques y a la incipiente oferta de equipamientos necesarios para el montaje de plantas de BTC de manera semi industrializada.

Sin embargo, una serie de problemas estructurales impiden que esta tecnología avance hacia un nivel de mayor desarrollo comercial e incorporación a los marcos tecnológicos locales, siendo uno de los problemas principales la falta de regulaciones específicas sobre la producción, comercialización y construcción con BTC, lo cual atraviesa los aspectos de producción, construcción y comercialización:

- En cuanto a la producción, no existe una normativa que determine estándares de calidad en los procesos productivos, lo que repercute en su comercialización en la medida en que no pueden comercializarse productos sin certificación de calidad. La oferta de BTC sin parámetros mínimos de calidad contribuye al desconocimiento general de esta tecnología y genera desconfianza que profundiza los problemas identificados.
- En las instancias de construcción, al no estar contemplado en los códigos de edificación, a pesar de encontrarse en numerosas leyes municipales sancionadas desde el año 2010, las obras deben realizarse de manera excepcional o fuera de la normatividad, con los riesgos estructurales que esto conlleva principalmente en zonas sísmicas.
- En lo que respecta al acceso al crédito, el financiamiento de obras públicas y privadas es difícil ya que los organismos crediticios desconocen esta tecnología y, ante la falta de normativa específica, tienden a fomentar la construcción de viviendas con tecnologías denominadas “tradicionales”, tales como el ladrillo común o el bloque de hormigón.

VI.1.b Materiales

Los estudios de caracterización realizados sobre los materiales empleados en la investigación permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- La tierra y arena empleadas, representativas de los suelos y arenas propios del centro-oeste santafesino, no son los óptimos para la fabricación de BTC debido al elevado contenido de limos y ausencia de partículas de tamaño arena en la tierra; y por la forma redondeada y tamaño pequeño y uniforme de las partículas de arena. Sin embargo, los resultados obtenidos al combinar ambos materiales demuestran que puede elaborarse un mortero apropiado para la fabricación de BTC.
- Tanto el polvo de ladrillo como la puzolana estudiados poseen capacidades puzolánicas; sin embargo, estas son menores que las de otras adiciones minerales ampliamente estudiadas en el contexto local, nacional e internacional.
- La pureza de las cales comercialmente disponibles en la ciudad de Santa Fe, medida en función de su contenido de hidróxido de calcio, es variable. Para esta investigación se analizaron dos proveedores diferentes, contando una de ellas (Blancaley) con un contenido de CaOH_2 inferior al 30%, lo cual la hace inadecuada para su empleo en la estabilización de BTC, y la otra (Andina) con un contenido de CaOH_2 del 67%, apto para la estabilización de BTC.

VI.1.c Efectos de la relación tierra/arena y de la estabilización con cal y con cemento

- La relación tierra/arena para los bloques sin estabilizante y con un 10 % de cal Andina no tiene incidencia significativa en la resistencia a compresión de los BTC. Sin embargo, para los BTC estabilizados con un 10% de cemento Portland, se advierte un incremento en la resistencia a compresión en función del mayor contenido de material grueso, generándose la mayor resistencia para las series con una relación tierra/arena igual a 1.
- Sobre los BTC estabilizados con cal, puede afirmarse que su resistencia a compresión, independientemente del porcentaje de cal utilizado, es similar que la resistencia a compresión de la serie sin estabilizantes químicos.
- La resistencia de los BTC con cemento está influenciada por el porcentaje de estabilizante empleado: los bloques estabilizados con 2.5% y 5% de cemento presentaron una resistencia a compresión similar a la de los BTC sin estabilizante alguno. Los bloques con

10% y 15% de cemento presentaron desde el punto de vista estadístico resistencias similares entre sí, pero superiores a las de sus homólogos con bajos contenidos de cemento (2.5% y 5%), mientras que la serie estabilizada con 20% de cemento presentó una resistencia superior a la de las demás series.

VI.1.d Propiedades químicas de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales

- Las pruebas de microscopía electrónica realizadas sobre las muestras estabilizadas confirman la formación de etringita en las series estabilizadas con cal Andina y adiciones minerales.
- En los difractogramas de las series estabilizadas con cal Andina y adiciones minerales, las únicas fases identificadas, además de los minerales propios de la tierra y la arena, son la calcita y Portlandita. Podría asumirse la presencia de S-C-H y A-C-H, aunque esto no puede asegurarse ya que sus picos característicos, a pesar de encontrarse en los difractogramas de las diferentes series estabilizadas, se solapan con los picos característicos de la calcita, Portlandita, cuarzo y albita.
- Los patrones TEM y SAED indican la formación de fases amorfas de S-C-H en las series estabilizadas con cal y adiciones minerales, pero en menor medida que en las series de comparación estabilizadas con cemento Portland, en las cuales esta fase fue detectada incluso por DRX.

VI.1.e Propiedades físicas y mecánicas de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales

- Existe una correlación directa entre la fuerza de compresión empleada durante la fabricación de los bloques, la densidad, la resistencia a compresión y la absorción de agua, demostrándose que, a mayor energía de compactación, se obtienen bloques de mayor densidad y menor porosidad, lo cual mejora de manera significativa la resistencia a compresión y durabilidad, disminuyendo la absorción de agua.
- La estabilización con cal Andina y adiciones minerales no genera incrementos en la resistencia a compresión de los BTC, siendo incluso el resultado de este parámetro inferior al requerido para adobes. En este sentido, se puede concluir que empleando la tierra y la arena propias del centro-oeste santafesino, únicamente los BTC estabilizados con un 10 % en peso o más de cemento Portland presentan valores acordes a los

requeridos por la normativa argentina para la construcción de muros portantes de ladrillos comunes, ladrillos cerámicos o de bloques de hormigón.

- Los resultados de los ensayos de absorción de agua por capilaridad y resistencia a erosión húmeda de las series estabilizadas únicamente con cal y las series con diferentes porcentajes de reemplazo de adiciones minerales permiten inferir que el desarrollo de las reacciones puzolánicas y la formación de C-(A)-S-H es escaso. Se entiende que las adiciones minerales y las impurezas de la cal (cuarzo y carbonato de calcio) se comportan como materiales inertes, aumentando el porcentaje de absorción de agua y disminuyendo la resistencia a erosión húmeda.
- La estabilización de BTC con cal y adiciones minerales, a pesar de no generar incrementos en la resistencia a compresión, permite mejorar su desempeño en relación al desgaste producido por la intemperie y su resistencia cuando son sometidos a la inmersión en agua, comparado con BTC sin estabilizar.

VI.1.f Impacto ambiental de los BTC estabilizados con cal y adiciones minerales

- La estabilización de los BTC con cal o con cemento, aun en pequeñas cantidades, es el factor que genera el principal impacto ambiental negativo de estos bloques.
- El reemplazo de cal por cemento en la estabilización de los BTC no disminuye de manera significativa el impacto ambiental negativo vinculado a su producción. Los únicos ítems que disminuyen su impacto negativo al realizar reemplazos parciales de cal por las adiciones minerales en estudio son el calentamiento global, el consumo de combustibles fósiles y el deterioro de la capa de ozono. Por el contrario, la eutrofización del agua, el consumo de minerales y el consumo de agua aumentan de manera significativa con el reemplazo parcial de cal por las adiciones en estudio.

VI.2 CONCLUSIONES GENERALES Y COMENTARIOS FINALES

Un primer aspecto importante de los resultados obtenidos es la confirmación que tanto el polvo de ladrillo como la puzolana utilizados en esta tesis poseen propiedades puzolánicas limitadas y, en combinación con el hidróxido de calcio, forman pequeñas cantidades de fases amorfas de C-(A)-S-H con propiedades cementantes. Sin embargo, también se ha observado que en comparación con las muestras de BTC estabilizadas únicamente con cal, el uso de pequeñas

cantidades de ambas adiciones minerales en combinación con cal aérea hidratada en la fabricación de BTC no mejora sus propiedades físicas y mecánicas. Este comportamiento se atribuye a varios factores:

- La baja actividad puzolánica de las adiciones minerales utilizadas, las cuales, luego de 16 días en contacto con una solución saturada de Ca(OH)_2 en condiciones ideales para la formación de fases hidratadas, consumen menos del 60% del Ca^{+2} disponible.
- El bajo grado de pureza de la cal (contenido Ca(OH)_2 del 67%) limita el desarrollo de las reacciones puzolánicas. Esto resultó más evidente en las muestras en las que parte de la cal se reemplazó por alguna de las adiciones minerales. Asimismo, se observó que el contenido de Ca(OH)_2 disponible puede reducirse aún más por el desarrollo de reacciones de carbonatación durante el curado y secado de los BTC.
- Puede inferirse además, que la cantidad relativamente baja de agua utilizada durante la fabricación de las muestras (13 % en peso) es responsable en parte de la cantidad limitada de fases puzolánicas formadas durante el curado de los BTC.

Un segundo aspecto importante se refiere a la clara diferencia entre la resistencia a compresión de los BTC estabilizado con cal y los estabilizados con cemento Portland, alcanzando estos últimos valores superiores a 5 MPa y justificando su uso en la construcción de muros de carga. Por el contrario, la adición de cal tuvo un efecto negativo en la resistencia a la compresión de los BTC, incluso si se la compara con la de los bloques sin estabilizar. Sin embargo, la incorporación de cal como estabilizante mejora de manera significativa la resistencia de los BTC a los efectos agresivos del agua (erosión húmeda y absorción de agua por absorción y capilaridad). Estos sugieren que los BTC estabilizados con cal podrían emplearse en la construcción de muros de cerramiento exteriores que no soporten cargas estructurales.

Un tercer aspecto importante demostrado es que la estabilización con cal y adiciones minerales no tiene efectos favorables en las propiedades físicas, mecánicas y ambientales de los BTC, comparándolas con las de sus homólogos estabilizados con igual contenido de cemento Portland. Es importante destacar además que la metodología diseñada y empleada en esta investigación, en la cual se confeccionaron diferentes tipos de probetas y se realizaron ensayos físicos, mecánicos y químicos tanto de los materiales y morteros constitutivos de los bloques, como de las probetas y BTC producidos en fábrica y en laboratorio constituyen un importante avance en

la metodología para el estudio del BTC. Debe remarcar el hecho de que la realización de ensayos químicos específicos de la ingeniería de materiales para el estudio del BTC es pionera en Argentina. La interpretación de estos resultados en combinación con los de los ensayos físico-mecánicos permitió validar las conclusiones de esta investigación.

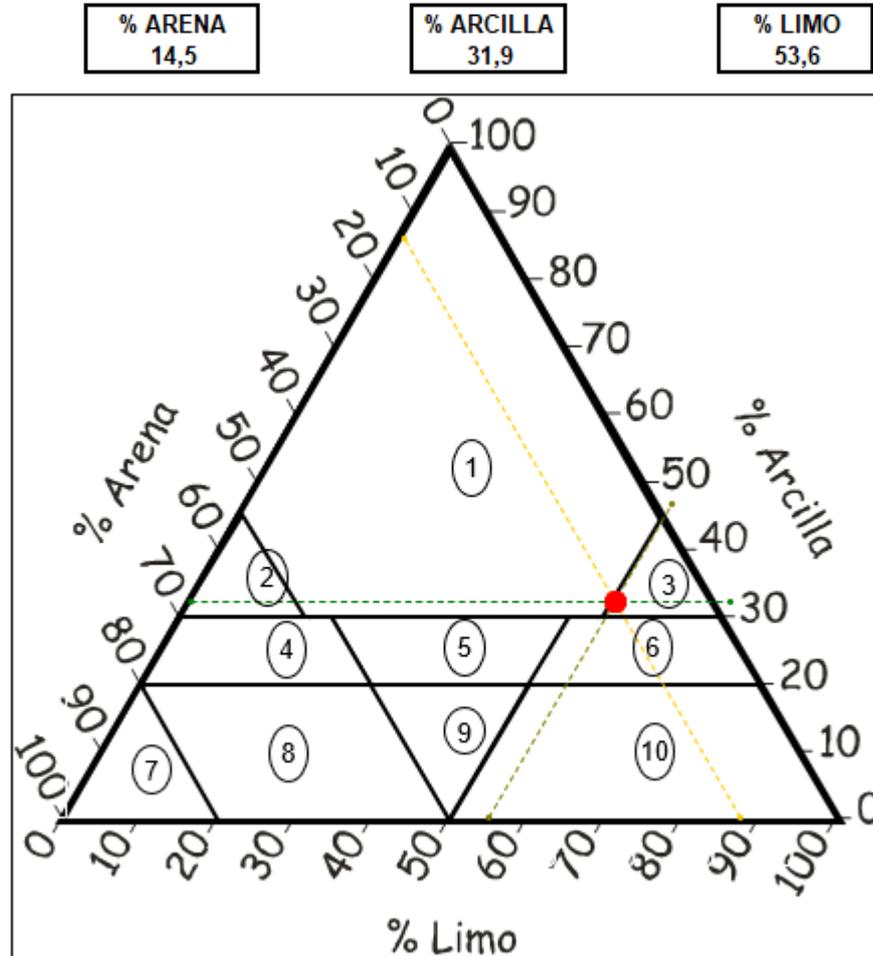
Finalmente, lo expresado en los párrafos anteriores permite *refutar* la hipótesis de trabajo propuesta en esta tesis, según la cual *“la utilización de cal y materiales puzolánicos como estabilizantes para el mortero de los BTC puede reemplazar total o parcialmente al cemento Portland, sin que esto modifique las principales propiedades de resistencia y durabilidad de los bloques”*.

VI.3 CONTINUIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

A partir de los aportes realizados por esta investigación se estima que para continuar la línea de trabajo en este tema podrían ser relevantes las siguientes acciones y aspectos:

- Elaborar el Análisis de Ciclo de Vida de otros mampuestos comúnmente empleados en la región –como el bloque de hormigón o el ladrillo- comparando su impacto ambiental con el de los BTC estabilizados con 5 y 10% de cemento, y su impacto económico en la construcción.
- Profundizar en el estudio de la interacción química entre el suelo de la región y el hidróxido de calcio, con el fin de establecer las razones de la disminución de la resistencia a compresión de las muestras estabilizadas con cal en comparación con las muestras sin estabilizar.
- Evaluar el efecto del reemplazo parcial de cal por otro tipo de adiciones minerales como el metakaolin, las cenizas volantes o la tierra diatomea en las propiedades de los BTC.
- Estudiar alternativas de curado de los BTC que faciliten el desarrollo de las reacciones puzolánicas entre adiciones minerales y cal aérea hidratada.

ANEXO I



Referencias

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1- Arcilla | 6- Loam arcillo limoso |
| 2- Arcilla arenosa | 7- Arena |
| 3- Arcilla limosa | 8- Loam arenoso |
| 4- Loam arcillo arenoso | 9- Loam |
| 5- Loam arcilloso | 10- Loam limoso |

Referencia bibliográfica:

"Mecánica del suelo", Terzaghi - Peck (1958)
 - Gráfico del Public Roads para la clasificación de suelos

Figura 140: Identificación de la tierra según su distribución granulométrica. **Fuente:** Elaboración propia a partir de planillas aportadas por la Dirección Provincial de Vialidad, Santa Fe.

ANEXO II

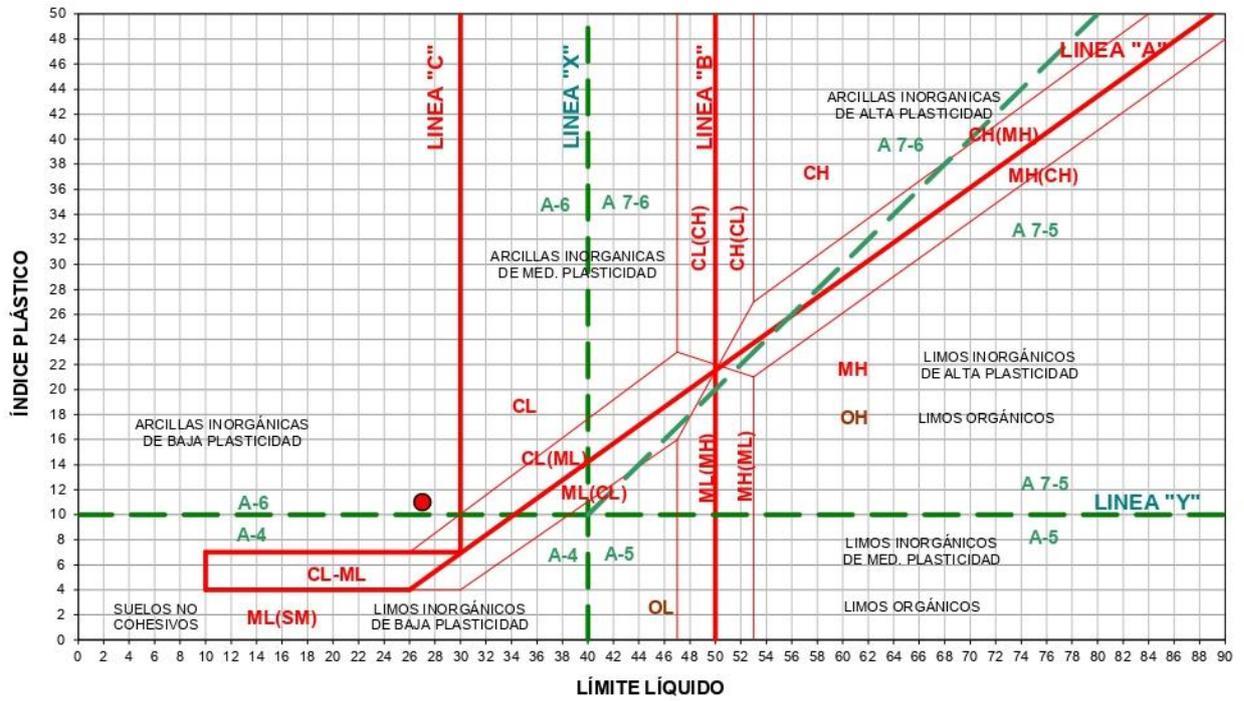


Figura 141: Identificación de la tierra según su plasticidad. **Fuente:** Elaboración propia a partir de planillas aportadas por la Dirección Provincial de Vialidad, Santa Fe.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INDEC, INDEC, Inst. Nac. Estadística y Censos. (2020). <https://www.indec.gob.ar/>.
- [2] INDEC, Indicadores de condiciones de vida de los hogares en 31 aglomerados urbanos, Inst. Nac. Estadística y Censos. 4 (2019).
https://www.indec.gob.ar/uploads/informesdeprensa/eph_indicadores_hogares_02_194FEEBEB8E1.pdf.
- [3] M. Marcos, M.M. Dio Virgilio, G. Mera, El déficit habitacional en Argentina. Una propuesta de medición para establecer magnitudes, tipos y áreas prioritarias de intervención intra-urbana, *Relmeccs*. 8 (2018) 1–28.
- [4] M.B. Rodulfo, Políticas habitacionales en Argentina. Estrategias y desafíos, Buenos Aires, 2016.
- [5] D. Arriagada, Brick House. Rosario, Argentina, ARQ. (2017).
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-69962017000100074>.
- [6] S. Curadelli, M. López, R. Piastrellini, P. Arena, B. Civit, Estudio Socioambiental de la Producción de Ladrillos Artesanales en Mendoza desde la Perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida, edUTecNe, Mendoza, 2019.
- [7] AABH, Asociación Argentina de Bloques de Hormigón, 2021. (2021) Mampostería de Bloques de Hormigón. http://aabh.org.ar/aabh_bootstrap/index.php.
- [8] CamArCo, Cámara Argentina de la Construcción, Indicadores Prod. y Consum. Mater. (2021). https://www.camarco.org.ar/categorias_indicadores/produccion-y-consumo/.
- [9] J.E. Aubert, A. Fabbri, J.C. Morel, P. Maillard, An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa!, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 366–369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068>.
- [10] H. Houben, H. Guillaud, *Traité de construction en terre*, Edición Pa, Craterre - Parentèses, 2006.
- [11] C. Neves, O. Borges Farías, *Técnicas de Construcción con Tierra*, FEB-UNESP / PROTERRA, Bauru, 2011.
- [12] B. Rudofsky, *Arquitectura sin arquitectos*, Editorial universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 1973.
- [13] M.G. Cuitiño, *Arquitectura en zonas sísmicas. Estudio energético, ambiental y técnico-económico de construcciones sustentables con quincha*, Universidad Nacional de Salta, 2013.
- [14] J. Dethier, J. Cohen, *Arquitecturas de tierra: El arte de construir con tierra. Pasado, presente y porvenir*, BLUME, Barcelona, 2019.
- [15] D. Gauzín-Müller, *Architecture en terre d'aujourd'hui*, 1°, CRATerre éditions, 2016.
- [16] G.M. Viñuales, *Tecnología y construcción con tierra*, Apuntes. 20 (2007) 220–231.
- [17] M. Béguin, H. Guillaud, A. Misse, S. Moriset, M. Poinet, *Rehabiliter le pise - vers des pratiques adaptees*, Actes Sud - Craterre, 2018.
- [18] D.E. Ángulo Jaramillo, A. Carreño Carry, El Bloque de Tierra Comprimido o BTC Una alternativa de Construcción para la Arquitectura Contemporánea., *NODO*. 12 (2017) 31–37.
<http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/655>.
- [19] J. Salas Serrano, *Habiterra*, exposición Iberoamericana de construcción con tierra, (1995).
- [20] C. Neves, O. Borges Faria, R. Rotondaro, P. Cevallos, M. Hoffman, Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra, 2009. <http://www.redproterra.org>.
- [21] G.R. Palacios Cardoza, Análisis técnico-económico del suelo-cemento en pisos de viviendas de bajos recursos, Universidad Nacional de Piura, 2019. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1482>.
- [22] A. Guillarducci, *Generación de Adiciones Minerales para el Cemento Portland a Partir de Residuos de Centrales Termoeléctricas de Lecho Fluidizado*, Universidad Nacional del Litoral, 2018.
- [23] FOCCAL, *Foro Mexicano de Construcción con Cal*, (2021). www.foccal.org.
- [24] R. Maddalena, J.J. Roberts, A. Hamilton, Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements, *J. Clean. Prod.* 186 (2018) 933–942. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>.
- [25] G.M. Guapi Cepeda, K.D. Yagual Flores, Análisis de la producción de cal de la comuna san Antonio como oferta exportable a los mercados internacionales, Universidad de Guayaquil, 2017.
- [26] Q. Qiu, A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and

- characterization techniques, *Constr. Build. Mater.* 247 (2020) 118503.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118503>.
- [27] M. Laguna, Ladrillo Ecológico Como Material Sostenible para las Construcción, universidad Publica De Navarra, 2011.
- [28] H.B. Nagaraj, M. V. Sravan, T.G. Arun, K.S. Jagadish, Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks, *Int. J. Sustain. Built Environ.* (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.ijse.2014.03.001>.
- [29] J. González López, C. Juárez Alvarado, B. Ayub Francis, J. Mendoza Rangel, Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 163 (2018) 179–188.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074>.
- [30] S. Cabrera, A. González, Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Evaluación de dosificaciones y resistencia a la compresión, in: III encuentro latinoamericano y europeo de edificaciones y comunidades sostenibles, in: III Encuentro Latinoam. y Eur. Edif. y Comunidades Sostenibles, Santa Fe, 2019: pp. 210–219.
- [31] S.N. Malkanthi, N. Balthazaar, A.A.D.A.J. Perera, Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt, *Case Stud. Constr. Mater.* 12 (2020).
- [32] Y. Wang, Z. Shui, L. Wang, X. Gao, Y. Huang, Q. Song, K. Liu, Alumina-rich pozzolan modification on Portland-limestone cement concrete: Hydration kinetics, formation of hydrates and long-term performance evolution, *Constr. Build. Mater.* 258 (2020) 119712.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119712>.
- [33] F. Masazza, Pozzolana and Pozzolanic Cements, in: *Lea's Chem. Cem. Concr.*, Oxford - Elsevier Ltd., 2004: pp. 241–297.
- [34] M. Bediako, Pozzolanic potentials and hydration behavior of ground waste clay brick obtained from clamp-firing technology, *Case Stud. Constr. Mater.* 8 (2018) 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.11.003>.
- [35] AENOR, UNE-EN 197-1. Cementos. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de cementos comunes, Madrid, 2011.
- [36] F. Massazza, Pozzolana and Pozzolanic Cements, in: *Lea's Chem. Cem. Concr.*, Oxford - Elsevier Ltd, 2004: pp. 471–635.
- [37] A. Giovambattista, HORMIGÓN: materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005, (2011).
- [38] M.A. Giraldo, J.I. Tobón, Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación, *Dyna.* 73 (2006) 69–81.
- [39] S.A. Lima, H. Varum, A. Sales, V.F. Neto, Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 829–837.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127>.
- [40] P. Doat, H. Hays, H. Houben, S. Matuk, F. Vitoux, *Building with earth*, CRATerre éditions, París, 1985.
- [41] V. Rigassi, *Compressed Earth Blocks: Manual of Production*, GATE / BASIN., Eschborn, 1985.
- [42] GracoMAC, Máquinas para fabricar bloques ecológicos, (2021). <https://gracomaq.net/>.
- [43] R. Mattone, Investigación y formación para la evolución de las tradiciones. Los bloques perfilados para la autoconstrucción, *Apuntes.* 20 (2007) 318–323.
- [44] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction, *Constr. Build. Mater.* 29 (2012) 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>.
- [45] M. Vázquez Espi, Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales, *Inf. La Construcción.* 52 (2001) 29–43. <https://doi.org/10.3989/ic>.
- [46] R. Roux Gutiérrez, J. Espuna Mujica, El hidróxido de calcio y los bloques de tierra comprimida, alternativa sostenible de construcción, *Nov. Sci.* (2016). <https://doi.org/10.21640/ns.v5i9.163>.
- [47] IRAM, Norma IRAM 11601: Aislamiento térmico de edificios Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario, Buenos Aires, 2004.
- [48] P. Mosquera Arancibia, Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra

- comprimida, Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- [49] Deutsches Institut für Normung, DIN 4108-4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Berlín, 2017.
- [50] Y.G. Aranda Jimenez, Estabilizantes utilizados en la elaboración de BTC, in: Los Bloques Tierra Comprimida En Las Zo. Húmedas, Plaza y Valdez S.A., México D.F., 2010: pp. 27–42.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [51] S. Cabrera, Y.G. Aranda Jiménez, S.D.E. Joathan;, R. Rotondaro, Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal y cemento. Evaluación de su impacto ambiental y su resistencia a compresión, Hábitat Sustentable. 10 (2020) 70–81. [https://doi.org/Bloques de Tierra Comprimida \(BTC\) estabilizados con cal y cemento. Evaluación de su impacto ambiental y su resistencia a compresión](https://doi.org/Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal y cemento. Evaluación de su impacto ambiental y su resistencia a compresión).
- [52] F. Galíndez, Aportes de la tecnología para la fabricación del BTC, Salta, 2007.
- [53] S. Cabrera, A. González, R. Rotondaro, Resistencia a compresión en Bloques de Tierra Comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo, Inf. La Construcción. 72 (2020).
<https://doi.org/https://doi.org/10.3989/ic.70462>.
- [54] INTI-CIRSOC, CIRSOC 501: Reglamento Argentino de estructuras de mampostería, Buenos Aires, 2007.
- [55] INPRES-INTI-CIRSOC, INPRES CIRSOC 103-III: Reglamento Argentino de para construcciones sismoresistentes. Parte III: Construcciones de mampostería, Buenos Aires, 2016.
- [56] IRAM, Norma IRAM 12566-1: Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de tabiques y muros. Parte 1: Macizos, Buenos Aires, 2005.
- [57] IRAM, Norma IRAM 12566-2: Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de tabiques y muros. Parte 2: Perforados y huecos, Buenos Aires, 2005.
- [58] IRAM, Norma IRAM 11561-2: Bloques no portantes de hormigón, Buenos Aire, 2018.
- [59] IRAM, Norma IRAM 11561-3: Bloques portantes de hormigón, Buenos Aires, 2012.
- [60] IRAM, Norma IRAM 1701-1: Hormigón celular curado en autoclave (HCCA). Parte 1: Clasificación y requisitos, Buenos Aires, 2003.
- [61] C. Benvenuto, G. Darrás, S. Cabrera, A. González, Analisis de una unidad productiva para la fabricacion industrializada de Bloques de Tierra Comprimida (BTC), in: XIX Semin. Iberoam. Arquít. y Construcción Con Tierra, Ibomex / PROTERRA, Oaxaca, 2019.
- [62] H. Houben, H. Guillaud, Earth Construction Technology, Craterre - EAG, Nairobi, 1992.
- [63] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk, F. Vitoux, Building with earth, New Delhi, 1991.
- [64] S. Boubekur, V. Rigassi, A. Mesabah, J.C. Morel, H. Houben, W. Carazas, S. Dugelay, A. Douline, Compressed earth blocks: testing procedures, CRATerre-EAG, 2000.
- [65] H. Houben, S. Boubekur, Compressed earth blocks : standards, Bruxelles, 1998.
- [66] H. Houben, P.-E. Verney, Compressed earth blocks : selection of production equipment, Craterre - EAG, Bruxelles, 1989.
- [67] Craterre EAG, Le bloc de terre comprimée : éléments de base, GATE, 1991.
- [68] H. Guillaud, T. Joffroy, P. Odul, Compressed Earth Blocks: Manual of design and construction, Craterre - EAG, 1985.
- [69] Y.G. Aranda Jimenez, Características del BTC ante diferentes concentraciones de mucilago de nopal y sabila agregadas al agua de mezclado, Universidad Autónoma de Tamaulipas, 2009.
- [70] J.J. Falceto, Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción., Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
<http://oa.upm.es/14647/>.
- [71] C. Flament, Valorisation des fines de lavage de granulats: application a la construction en terre-cruie, Université d'Artois, 2012.
- [72] O. Yepes Gaviria, C.M. Bedoya Montoya, El Bloque de Suelo Cemento (CSC) al Bloque de Suelo Geopolimerizado (BSG), Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [73] E. Butynsky, F. Díaz Belzunegui, L. Lloret, Producción de bloques eco modulares suelo cemento en Argentina. Estudio de pre-factibilidad., Universidad Tecnológica Nacional, 2017.

- [74] L.G. Barrozo, Investigación sobre el uso de Bloques de Tierra Compactada (BTC) Su aplicación en el Centro Comunitario “Casas Viejas”, Universidad Nacional de Tucumán, 2019.
- [75] Y.G. Aranda Jimenez, E.J.S.-D. Suárez-Domínguez, Efecto de la impermeabilidad del Mucílago de Nopal en bloques de tierra comprimidos, *Nov. Sci.* 6 (2014).
- [76] A. Vissac, A. Bourges, D. Gandreau, *Argiles & Biopolymères. Les stabilisants naturels pour la construction en terre*, CRATerre éditions, Grenoble, 2017.
- [77] J. Arteaga Paucar, L. Loja Saula, Diseño de adobes estabilizados con emulsión asfáltica, Universidad de Cuenca, 2018.
- [78] M. Mostafa, N. Uddin, Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces, *Case Stud. Constr. Mater.* 5 (2016) 53–63.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.07.001>.
- [79] R. Roux Gutiérrez, A. Espuna Mújica, Bloques de Tierra Comprimida adicionados con fibras naturales, Plaza y Valdez, México D.F., 2012.
- [80] G. Araya-Letelier, F.C. Antico, C. Burbano-García, J. Concha-Riedel, J. Norambuena-Contreras, J. Concha, Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers, *Constr. Build. Mater.* 276 (2021).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>.
- [81] M. Vázquez, D. Guzman, J. Iñiguez, Comparación entre propiedades físicas y mecánicas de adobes tradicionales y BTC estabilizados químicamente, in: 15° Semin. Iberoam. Arquitect. y Construcción Con Tierra, PROTERRA, Cuenca, 2015: pp. 1–9.
- [82] J. Concha-Riedel, F. Antico, G. Araya-Letelier, Mechanical and damage similarities of adobe blocks reinforced with natural and industrial fibres, *Matéria.* 25 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1206>.
- [83] G. Araya-Letelier, J. Concha-Riedel, F. Antico, C. Sandoval, Experimental mechanical-damage assessment of earthen mixes reinforced with micro polypropylene fibers, *Constr. Build. Mater.* 198 (2019) 762–776.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.261>.
- [84] C. Turco, A. Paula Junior, E. Teixeira, R. Mateus, Optimisation of Compressed Earth Blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review, *Constr. Build. Mater.* 309 (2021).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125140>.
- [85] VITA, Fabricación de bloques de construcción con la prensa CINVA, Maryland, 1966.
- [86] UNDP, Cinva-Ram: Máquina para fabricar bloques de suelo-cemento, Bogotá, 1987.
- [87] ABNT, NBR 8492: Tijolo de solo-cimento. Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio, São Paulo, 2012.
- [88] ICONTEC, NTC 5324: Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Metodos de ensayo. Condiciones de entrega, Bogotá, 2005.
- [89] R. Mellace, C. Alderete, L. Arias, S.M. Latina, I. Ferreyra, El suelo-cemento, un recurso tecnológico para la construcción de edificios, (2012).
- [90] L. Arias, C. Alderete, Variación de la resistencia a compresión del BTC en función de la energía de compactación, in: Semin. “Somos Tierra Que Camina,” La Rioja, 2017.
- [91] J.D. Sitton, Y. Zeinali, W.H. Heidarian, B.A. Story, Effect of mix design on compressed earth block strength, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>.
- [92] B.M. Mansour, E. Ogam, A. Jelidi, A.S. Cherif, S. Ben Jabrallah, Influence of compaction pressure on the mechanical and acoustic properties of compacted earth blocks: An inverse multi-parameter acoustic problem, *Appl. Acoust.* 125 (2017) 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.04.017>.
- [93] G. Ruiz, X. Zhang, W.F. Edris, I. Cañas, L. Garijo, A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 176 (2018) 566–572.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.077>.
- [94] M.S. Amalkar, M. Ali, K.S. Jagadish, Strength of stabilized mud block masonry, *J. Build. Pathol. Rehabil.* 6 (2021) 8. <https://doi.org/10.1007/s41024-020-00101-2>.
- [95] S. Diamond, E. Kinter, Mecánica de la estabilización del suelo – cal. Una revisión interpretativa, *Carreteras.* 12 (1971) 3–16.

- [96] National Lime Association, Lime-Treated Soil Construction Manual: Lime Stabilization & Lime Modification, 2004.
- [97] A. González, Análisis de las propiedades del Bloque de Tierra Comprimida (BTC) estabilizado con cal y otros aglomerantes no cementicios, Santa Fe, 2018.
- [98] M.M. Barbero-Barrera, F. Jové-Sandoval, S. González Iglesias, Assessment of the effect of natural hydraulic lime on the stabilisation of compressed earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 260 (2020) 119877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119877>.
- [99] K.A.J. Ouedraogo, J.-E.E. Aubert, C. Tribout, G. Escadeillas, G. Escadeilas, Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant?, *Constr. Build. Mater.* 236 (2020) 117578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>.
- [100] R.S. Roux Gutierrez, V.M. García Izaguirre, J.A. Espuna Mujica, Los materiales alternativos estabilizados y su impacto ambiental, *Rev. Electrónica Nov. Sci.* 7 (2014) 243–266.
- [101] A. González, S. Cabrera, Métodos de evaluación del nivel de resistencia a la erosión húmeda en bloques de tierra comprimida, in: XVIII Semin. Iberoam. Arq. y Construcción Con Tierra, PROTERRA, Guatemala, 2018.
- [102] L. Miqueleiz, F. Ramírez, A. Seco, R.M. Nidzam, J.M. Kinuthia, A.A. Tair, R. Garcia, The use of stabilised Spanish clay soil for sustainable construction materials, *Eng. Geol.* 133 (2012) 9–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.010>.
- [103] A. Guettala, H. Houari, B. Mezghiche, R. Chebili, Durability of lime stabilized earth blocks, *Courr. Du Savoir.* 2 (2002) 61–66. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.531.232&rep=rep1&type=pdf>.
- [104] ONNCCE, Norma NMX-C-508: Industria de la Construcción. Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo, México D.F., 2015.
- [105] J. Eades, R. Grim, Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization, *Highw. Res. Board.* 262 (1960) 51–83.
- [106] H.B. Nagaraj, C. Shreyasvi, Compressed Stabilized Earth Blocks Using Iron Mine Spoil Waste - An Explorative Study, *Procedia Eng.* 180 (2017) 1203–1212. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.281>.
- [107] R.A. Silva, E. Soares, D. V. Oliveira, T. Miranda, N.M. Cristelo, D. Leitão, Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation, *Constr. Build. Mater.* 75 (2015) 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.038>.
- [108] J. Rivera, R. Mejía de Gutiérrez, S. Ramirez-Benavides, A. Orobio, Compressed and stabilized soil blocks with fly ash-based alkali-activated cements, *Constr. Build. Mater.* 264 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120285>.
- [109] R.K. Preethi, B.V. Venkatarama Reddy, Experimental investigations on geopolymer stabilised compressed earth products, *Constr. Build. Mater.* 257 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119563>.
- [110] E. Hanya, N. Fouadb, M. Abdel-Wahaba, E. Sadeka, Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement, *Constr. Build. Mater.* 281 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122535>.
- [111] O.S. Sore, A. Messana, E. Prud'homme, G. Escadeillasc, F. Tsobnanga, Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso, *Constr. Build. Mater.* 165 (2018) 333–345. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>.
- [112] SNZ, NZS 4297: Engineering Design of Earth Buildings, Wellington, 1998.
- [113] SNZ, NZS 4298: Materials and workmanship for earth buildings, Wellington, 1998.
- [114] SNZ, NZS 4299: Earth buildings not requiring specific design. Standards New Zealand., Wellington, 1998.
- [115] NMAC, NMAC 14.7.4: New Mexico earthen building materials code, New Mexico Construction Industries Division of the Regulation and Licensing Department, New Mexico, 2009.
- [116] Standars Australia, HB 195: The Australian Earth Building Handbook, Sydney, 2002.
- [117] J. Cid Falceto, F.R. Mazarrón, I. Cañas, Las normativas de construcción con tierra en el mundo, *Inf. La Constr.* 63 (2011) 159–169. <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>.

- [118] G. Rolón, P.R. Dorado, G. Varela Freire, J.E. Olivarez, Los factores de riesgo del mal de chagas y su relación con la construcción con tierra, in: R. Meyer Canillas, C. Neves (Eds.), *Memorias Del 16° Semin. Iberoam. Arq. y Construcción Con Tierra*, 2016: pp. 1–11.
- [119] G. Viñuales, Adobe y chagas. verdades y mitos de la construcción con tierra, in: C. Neves (Ed.), *Semin. Ibero-Americano Arquitetura e Construção Com Terra*, PROTERRA, São Luís, 2008: pp. 653–660.
- [120] P. Dorado, S. Cabrera, G. Barrozo, G. Rolón, Problemáticas asociadas al desarrollo de la tecnología de construcción con BTC en Argentina, in: Ibomex / PROTERRA (Ed.), *XIX Semin. Iberoam. Arq. y Construcción Con Tierra*, Oaxaca, 2019.
- [121] Red Protierra Argentina, Relevamiento y análisis de normas jurídicas y técnicas referidas a la construcción con tierra vigentes en la República Argentina, 2020. <http://redprotierra.com.ar/2020/07/15/relevamiento-y-analisis-de-normativas-de-construccion-con-tierra-en-argentina/>.
- [122] A. Dubos, C. De Greef, D.G. Gei, G. Rolón, J. Tomasi, L. Vélez, M.G. Watkins, M.R. Mandrini, M. Giardina, R. Rotondaro, V. Arruti, Relevamiento y análisis de normas jurídicas y técnicas referidas a la construcción con tierra vigentes en la República Argentina, (2020) 1–25. http://redprotierra.com.ar/wp-content/uploads/2020/07/ANALISIS-NORMAS-JURÍDICAS-Y-TÉCNICAS-CONSTRUCCION-CON-TIERRA-ARGENTINA_Completo.pdf (accessed March 5, 2021).
- [123] Red Protierra Argentina, Protocolo de ensayos sobre elementos constructivos para la construcción con tierra, 2020. <http://redprotierra.com.ar/2020/10/28/protocolos-de-ensayo-para-la-construccion-con-tierra/>.
- [124] A. Merrill, *Casas de tierra apisonada y suelo-cemento*, Windsor, Buenos Aires, 1949.
- [125] P. Dorado, S. Cabrera, G. Rolón, Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina, *J. Build. Eng.* (2021).
- [126] P. Dorado, S. Cabrera, G. Rolón, Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina, *J. Build. Eng.* (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103748>.
- [127] S. Cabrera, A. González, S. Noguera, El mapeo como herramienta para la difusión e intercambio de datos del BTC en Argentina, in: *IV Encuentro Latino-Americano e Eur. Sobre Edif. e Comunidades Sustentáveis*, ANTAC, Bahía, 2021.
- [128] S. Cabrera, Red Protierra Argentina, Mapeo de BTC, (2021). <http://redprotierra.com.ar/2020/10/20/btc-en-argentina-bloque-de-tierra-comprimida/>.
- [129] S. Cabrera, A. González, S. Noguera, El mapeo como herramienta para la difusión e intercambio de datos del BTC en Argentina, in: *IV Encuentro Latino-Americano e Eur. Sobre Edif. e Comunidades Sustentáveis*, ANTAC, Bahía, 2021.
- [130] IRAM, Norma IRAM-ISO 14040: Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia, Buenos Aires, 2017.
- [131] Copyright Pré, SimaPro 9, (2019). <https://simapro.com/>.
- [132] L. Google, Google Earth, (2021). <https://earth.google.com/web/>.
- [133] IRAM, Norma IRAM 50000: Cementos. Cementos para uso general. Composición y requisitos, Buenos Aires, 2019.
- [134] IRAM, Norma IRAM 10512: Mecánica de suelos. Método de análisis granulométrico, Buenos Aires, 1977.
- [135] IRAM, Norma IRAM 10507: Mecánica de suelos. Método de determinación de la granulometría mediante tamizado por vía húmeda, Buenos Aires, 1986.
- [136] IRAM, Norma IRAM 1520: Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua, Buenos Aires, 2002.
- [137] ASTM, D 422-63: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Pensilvania, 1990.
- [138] H. Lamb, *Hydrodynamics*, Cambridge University Press, 1993.
- [139] IRAM, Norma IRAM 10501: Geotecnia. Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad, Buenos Aires, 2007.
- [140] IRAM, Norma IRAM 10504: Suelos disturbados. Método de determinación de la contracción, Buenos Aires, 1976.

- [141] J.M. Martínez, M. Duval, F. López, J. Iglesias, J. Galantini, Ajustes en la estimación de carbono orgánico por el método de calcinación en molisoles del sudoeste bonaerense, 35 (2017) 181–187.
- [142] DNV, VN-E18-89: Método de campaña para la determinación de sales solubles y sulfatos en suelos, estabilizados y suelos granulares, Buenos Aires, 1989.
- [143] M. Faraldos, Técnicas de análisis y caracterización de materiales, Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2011. <https://elibro.net/es/lc/utnfrsf/titulos/41651>.
- [144] Panatec industria e investigación, Thermo Panatec, (2021). <http://www.panatec-industria.com/>.
- [145] J. Carles Melgajero, Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera, Boletín La Soc. Geológica Mex. 62 (2010) 1–23.
- [146] E. Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, Adsorption of gases in multimolecular layers, J. Am. Chem. Soc. 60 (1938) 309–319.
- [147] DNV, Procedimiento para la determinación del contenido de cal útil vial (CUV), Buenos Aires, 1998.
- [148] S. Donatello, M. Tyrer, C.R. Cheeseman, Comparison of test methods to assess pozzolanic activity, Cem. Concr. Compos. 32 (2010) 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008>.
- [149] A. Arizzi, G. Cultrone, Comparing the pozzolanic activity of aerial lime mortars made with metakaolin and fluid catalytic cracking catalyst residue: A petrographic and physical-mechanical study, Constr. Build. Mater. 184 (2018) 382–390.
- [150] IRAM, Norma IRAM 1695: Cales. Métodos de ensayo físicos, Buenos Aires, 1984.
- [151] K. Elert, J. Azañón, F. Nieto, Smectite formation upon lime stabilization of expansive marls, Appl. Clay Sci. 158 (2018) 29–36.
- [152] AENOR, Norma UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo, Madrid, 2008.
- [153] IS, IS 1725:2013. Specification for soil based blocks used in general building construction, New Delhi, 2013.
- [154] M. LLC, Minitab Statical Software, (2017).
- [155] R. Walpole, R. Myers, Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, Pearson Education, Ciudad de México, 2012.
- [156] M. Carretero-Ayuso, J. García-Sanz-Calcedo, Comparison between building roof construction systems based on the LCA, Rev. La Construcción. 18 (2018) 123–136.
- [157] UE, Norma Euro 5, Bruselas, 2007.
- [158] IRAM, Norma IRAM 10509: Mecánica de suelos. Clasificación de suelos, con propósitos ingenieriles, Buenos Aires, 1982.
- [159] DNV, VN - E4 - 84: Clasificación de suelos, 1984.
- [160] D. Kröhling, O. Orfeo, Sedimentología de unidades loésicas (Pleistoceno Tardío-Holo- ceno) del centro-sur de Santa Fe, AAS Rev. 9 (2002) 135–154.
- [161] M. Kröhling, D. & Iriondo, El Loess de la Pampa Norte en el bloque de San Guillermo, Rev. La Asoc. Argentina Sedimentol. 2 (2003) 137–150.
- [162] A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, B.V.V. Reddy, Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements. State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE, RILEM, 2022. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>.
- [163] AFNOR, XP P13-901: Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception, París, 2017.
- [164] J. Azañón, F. Nieto, Effects of lime treatments on marls, Appl. Clay Sci. 135 (2017) 611–619.
- [165] R. Alavéz-Ramírez, P. Montes-García, J. Martínez-Reyes, D.C. Altamirano-Juárez, Y. Gochi-Ponce, The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks, Constr. Build. Mater. 34 (2012) 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>.
- [166] M. Khemissa, A. Mahamedi, Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay, Appl. Clay Sci. 95 (2014) 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.017>.
- [167] L. De Windt, D. Deneele, N. Maubec, Kinetics of lime/bentonite pozzolanic reactions at 20 and 50 C: Batch tests and modeling, Cem. Concr. Res. 59 (2014) 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.024>.

- [168] E. Navrátilová, P. Rovnaníková, Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars, *Constr. Build. Mater.* 120 (2016) 530–539.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>.
- [169] M. Schmidt, H. Poellmann, A. Egersdoerfer, The use of a recycled glass powder and a expanded glass containing metakaolin in different binder systems, in: I.C.M.A. (ICMA) (Ed.), 34th Int. Conf. Cem. Microsc., Curran Associates, Inc, Halle, 2012.
- [170] K. Elert, E. Pardo, C. Rodriguez Navarro, Alkaline activation as an alternative method for the consolidation of earthen architecture, *J. Cult. Herit.* 16 (2015) 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.012>.
- [171] N. Rosenhurt, L. Rosso, L. Albano, Estudio del uso de tierras de diatomeas residuales en la generación de, in: U.T. Nacional (Ed.), Actas Las Jornadas Jóvenes Investig. Tecnológicos 2019, Santa Fe, 2019: pp. 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.33414/ajea.1.594.2019>.
- [172] Julián Zonni, J Zonni. Máquinas para la producción de ladrillos ecológicos, (2022). <http://jzonni.com.ar/>.
- [173] F. Galíndez, Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento, 2007.
- [174] B.M. Mansour, A. Jelidi, A. Soukaina, S. Ben, Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB), *Constr. Build. Mater.* 104 (2016) 44–51.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>.
- [175] S. Cabrera, Y.G. Aranda Jiménez, E.J. Domínguez Suárez, R. Rotondaro, Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal y cemento. Evaluación de su impacto ambiental y su resistencia a compresión, *Habitat Sustentable.* 10 (2020) 70–81. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.05>.
- [176] OSARTEC, RTS 91.02.01. Urbanismo y construcción en lo relativo al uso del sistema constructivo de adobe para viviendas de un nivel, San Salvador, 2014.
- [177] ABNT, NBR 16814: Adobe. Requisitos e métodos de ensaio, Río de Janeiro, 2020.
- [178] J. Fernandes, M. Peixoto, R. Mateus, H. Gervásio, Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks, *J. Clean. Prod.* 241 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>.