

Aplicación de FeO, ZnO y CuO como pigmentos en compuestos cerámicos

FeO, ZnO and CuO application as pigments in ceramic compounds

Karol Roa-Bohórquez¹
Ricardo Paredes-Roa²
Luis Lara-González³
Gabriel Peña-Rodríguez⁴

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: karol.roa@uptc.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8696-2232>

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: ricardo.paredes@uptc.edu.co; Colombia; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9172-8763>

³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia); correo: luisangel.lara@uptc.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2849-0174>

⁴Universidad Francisco de Paula Santander (Colombia); correo: ggabrielp@yahoo.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7114-9174>

Recibido: 01-08-2018 Aceptado: 22-03-2019

Cómo citar: Roa-Bohórquez, Karol; Paredes-Roa, Ricardo; Lara-González, Luis; Peña-Rodríguez, Gabriel (2019). Aplicación de FeO, ZnO y CuO como pigmentos en compuestos cerámicos. *Informador Técnico*, 83(1), 30-40.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1592>

Resumen

Entre los problemas más relevantes de la industria alfarera de Boyacá, Colombia, se encuentra la ausencia de una gama de tonalidades uniformes de sus productos finales. El color, por tratarse de una propiedad física fácilmente observable, se convierte en un criterio distintivo para clientes potenciales que buscan un producto diferenciador y a la vanguardia dentro de un medio en constante cambio. Por tal razón, el presente trabajo propuso un compuesto cerámico elaborado a partir de arcillas montmorillonitas y óxidos metálicos tales como FeO, CuO y ZnO. Las arcillas se caracterizaron por Fluorescencia de Rayos X (FRX) y de acuerdo a la composición química de cada arcilla, se determinaron las concentraciones de los óxidos metálicos como agentes colorantes, los cuales variaron de 1 a 8 % (en peso). Los prototipos cerámicos se conformaron por el método de prensado uniaxial a una presión de compactación constante de 15 MPa, posteriormente se sinterizaron a 950 °C durante 2 h. Mediante histogramas RGB se realizaron los análisis de color de los especímenes, los resultados mostraron cambios significativos en la pigmentación del compuesto cerámico reportando tono rojo, café y blanco. Lo anterior, hace viable la utilización de estos óxidos como pigmentos termoestables en la elaboración de productos cerámicos tales como: tejas, tabletas y baldosas, entre otros diseños cerámicos que hoy en día solo se pueden encontrar en tiendas de cerámica avanzada.

Palabras clave: pigmentos cerámicos; histogramas RGB; innovación; cerámicos; industria alfarera.

Abstract

Among the most relevant problems of the pottery industry in Boyacá, Colombia, is the absence of a range of uniform shades in their final products. The color, being an easily observable physical property, becomes a distinctive criterion for potential customers seeking a differentiating and cutting-edge product within a constantly changing environment. For that reason, the present work proposed a ceramic compound elaborated from montmorillonite clays and metal oxides such as FeO, CuO and ZnO. The clays were characterized by X-Ray Fluorescence (XRF) and according to the chemical composition of each clay, the concentrations of metal oxides were determined as coloring agents, which varied from 1 to 8 % (by weight).

The ceramic prototypes were shaped by uniaxial pressing method at a constant compaction pressure of 15 MPa, and then sintered at 950 °C for 2 h. RGB histograms were used to analyze the color of the specimens, the results showed significant changes in the pigmentation of the ceramic compound reporting red, brown and white tone. This makes viable the use of these oxides as thermosetting pigments in the production of ceramic products such as roof tiles, tablets and tiles among other ceramic designs, which today can only be found in advanced ceramic shops.

Keywords: ceramic pigments; RGB histograms; innovation; ceramics; pottery industry.

Introducción

La fabricación de cerámica en la región cundiboyacense en Colombia, data desde 1300 a.C. (Prieto, 2010), con la elaboración de ollas de barro y otros utensilios para el uso diario por parte de los *muisca*s. Luego, con la llegada de los españoles, la alfarería evolucionó notablemente debido al uso de hornos para la cocción de la arcilla con la cual se elaboraban ladrillos para la construcción de viviendas.

La técnica actual de fabricación de ladrillos comunes, se lleva a cabo con la combinación de arcillas rojas (en la mayoría de los casos illitas y montmorillonitas) (González; García, 1966) y desgrasantes (arenas silíceas), elementos que cumplen la función de disminuir la plasticidad de la mezcla y la contracción (Amado; Villafrades; Tuta, 2011). Una vez son homogeneizadas las materias primas, se agrega agua para el moldeo y se sinterizan las piezas a diferentes temperaturas dependiendo de la arcilla y el uso de las piezas (Torres; Hernández; Paredes, 2012). Como resultado, de acuerdo a la norma NTC 4205-1 (ICONTEC, 2009) se obtienen productos con diferentes características estructurales como resistencia mecánica entre 3-14 MPa y porcentajes de absorción de agua por debajo del 17 %.

La alfarería se ha convertido en una de las fuentes de sustento de la región y, asimismo, en una actividad generadora de problemáticas ambientales debido a los hornos que se utilizaban (Rojas; Carreño; Gómez, 2015). Estos hornos eran altamente contaminantes y poco eficientes. No obstante, hoy en día estos factores se han mitigado con reconversión tecnológica (Quijano; Díez-Silva; Montes-Guerra; Castro-Silva, 2014), realizando inversión en hornos con mayores eficiencias de combustión y menores emisiones a la atmósfera. Sin embargo, aunque las empresas alfareras realizaron un avance tecnológico importante, la técnica ha permanecido intacta desde hace más de un siglo (Simbaqueba, 1958), lo cual ha impedido innovar en aspectos importantes del diseño del producto como lo es el color.

El color ha sido uno de los problemas más representativos en la industria alfarera, la razón es la complejidad que se presenta en la modificación de la tonalidad de las arcillas, debido al desconocimiento de materias primas que sirvan como pigmentos termoestables e insolubles (Monrós; Badenes; García; Tena, 2003) y mantengan sus propiedades en la matriz original después del proceso de sinterización.

Así pues, la tonalidad en la superficie del ladrillo depende de la composición química y su proceso de sinterización (Gippini, 1966; Fernández, 1998; Guerrero; Espinel; Acevedo; Guillermo, 2017). Por ello, los métodos conocidos por la mayoría de las empresas ladrilleras para modificar el color, consisten en elevar la temperatura de cocción en el horno, mantener la misma por largos periodos (aproximadamente 24 h) o realizar una mezcla de arcillas (Patent No. 348,443, 1886; Betancourt; Martirena; Day; Díaz, 2007). Los dos primeros métodos generan múltiples efectos secundarios no deseados en el producto final tales como: desconchamientos, fragilidad, corazones negros, eflorescencias, sobrecostos e inventarios en proceso (Roa-Bohórquez; Paredes-Roa; Lara-González, 2018). Así mismo, se generan efectos en el medio ambiente debido a la mayor utilización del carbón, un recurso no renovable que aumenta los niveles de contaminación atmosférica. Además, la mezcla de arcillas requiere una variedad de minerales especiales y en la región cundiboyacense es complejo encontrar arcillas de este tipo.

Entre los sistemas tradicionales de medición de color, el RGB es uno de los más utilizados basado en el modelo de síntesis aditiva. Este modelo reúne los tres colores primarios (rojo, verde y azul) para la representación del color a través de receptores RGB, como cámaras, escáneres, sensores, entre otros.

Por consiguiente, en el presente estudio se busca dar una solución a la problemática planteada mediante la aplicación de pigmentos cerámicos que son generalmente utilizados en arcillas caoliníticas y no en arcillas comunes (montmorillonitas), con el fin de generar una gama de tonalidades en la superficie del ladrillo y diversificar la producción actual, ya que no solo se podrán fabricar ladrillos para fachada, también se podrán realizar tabletas, tejas, baldosas entre otros diseños cerámicos, que hoy en día se pueden encontrar en tiendas de cerámica avanzada.

Materiales y métodos

Materias primas y elaboración de muestras

Se recolectaron dos muestras de arcilla a través de un muestreo manual de cono y cuarteo, según los lineamientos de la Norma ASTM C 702 (2011). Este procedimiento se llevó a cabo en un yacimiento ubicado en el kilómetro 3 vía Sogamoso-Morcalá, en el departamento de Boyacá, Colombia.

Para lograr la gama de tonalidades, se seleccionaron tres óxidos metálicos de uso común: óxido de hierro Fe_2O_3 (Sigma Aldrich, 95 %), óxido de zinc ZnO (Sigma Aldrich, 99 %) y óxido de cobre CuO (Sigma Aldrich, 95 %). Se clasifican como pigmentos inorgánicos de tipo sintético para el óxido de hierro y de tipo opaco para los óxidos de zinc y cobre (ver Figura 1).

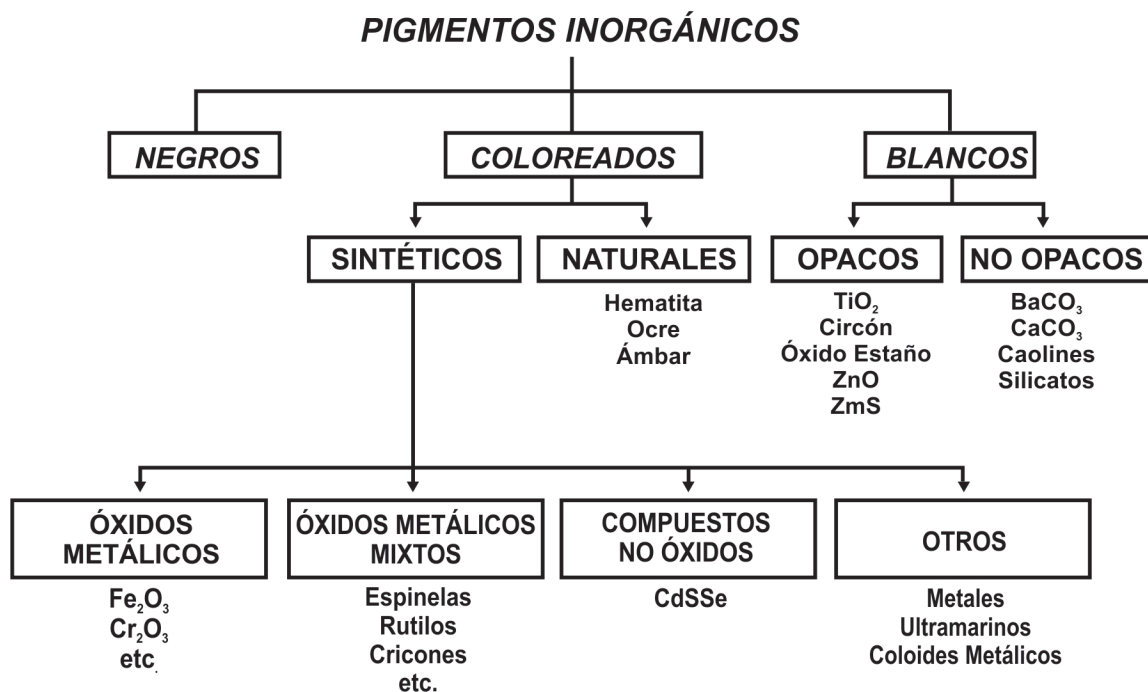


Figura 1. Clasificación de los pigmentos inorgánicos según el color deseado
Fuente: Monrós *et al.*, (2003)

La mezcla utilizada para la elaboración de las probetas consistió en: 2, 4, 6 y 8 % de óxido de hierro para la muestra de arcilla 2; 1, 2, 3 y 4 % de óxido de zinc y 4 % de óxido de cobre, para ambos óxidos se utilizaron las muestras de arcilla 1 y 2. Los prototipos se obtuvieron en forma de membranas circulares por el método de prensado uniaxial, manejando una presión de compactación constante de 15 MPa. Seguidamente, las membranas se sometieron a un proceso de secado a 100 ± 5 °C por 24 h hasta alcanzar una masa constante.

El proceso de sinterización se llevó a cabo en una mufla eléctrica Thermolyne ref. F6018 marca Thermo Scientific, la cual se programó para alcanzar dos rampas de sinterización a 600 y 950 °C, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min. Cada temperatura se mantuvo constante durante un intervalo de 2 h (ver Figura 2).

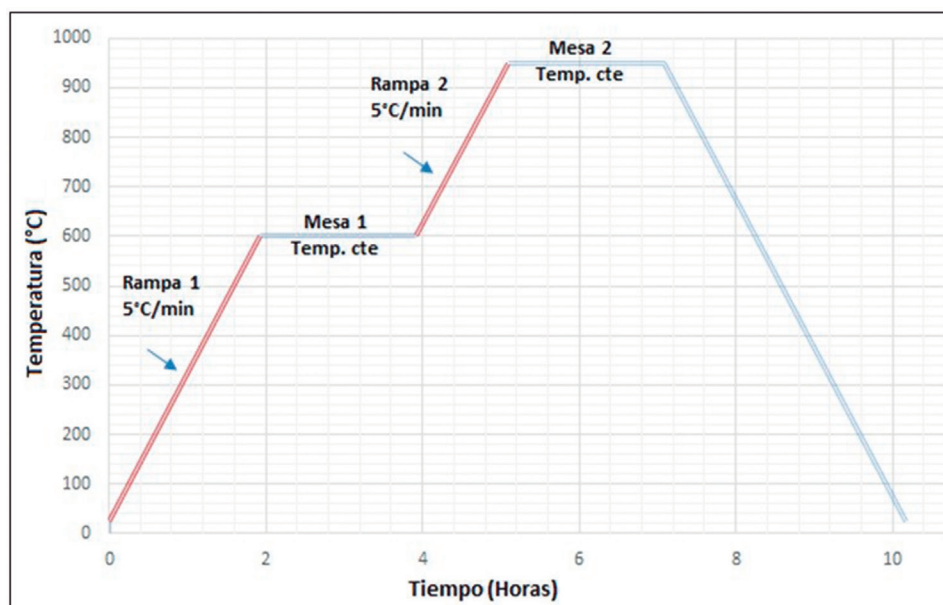


Figura 2. Curva de sinterización utilizada para la obtención de las membranas cerámicas
Fuente: elaboración propia

El análisis del color en cada membrana sinterizada se realizó con el software de procesamiento de imagen digital de dominio público ImageJ. Previo al estudio se fabricaron cajas de fotografía de iluminación constante con bombillas de 1000 W y se tomaron los siguientes parámetros estándar: ISO 100 para la no generación de ruido, apertura de diafragma de 1,5 y velocidad de obturación de 1/2000 s. La cámara fotográfica utilizada en el estudio es de referencia Nikon d5300.

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La composición química de las arcillas se determinó por Fluorescencia de Rayos X (FRX) en un equipo marca PANalytical MiniPal 2. Previo al análisis, cada muestra se trituro hasta alcanzar una granulometría malla #200 ASTM (0,08 mm). Los espectros de composición obtenidos se presentan en la Figura 3. De acuerdo al análisis semicuantitativo ambas muestras de arcilla revelaron que el compuesto más abundante es el óxido de silicio (SiO_2), con un contenido de 61,8 % para la muestra 1 y 56,1 % para la muestra 2 (Tabla 1). Después del óxido de silicio, la alúmina (Al_2O_3) se caracterizó por constituir un porcentaje importante en las muestras con 29 y 22 %, respectivamente.

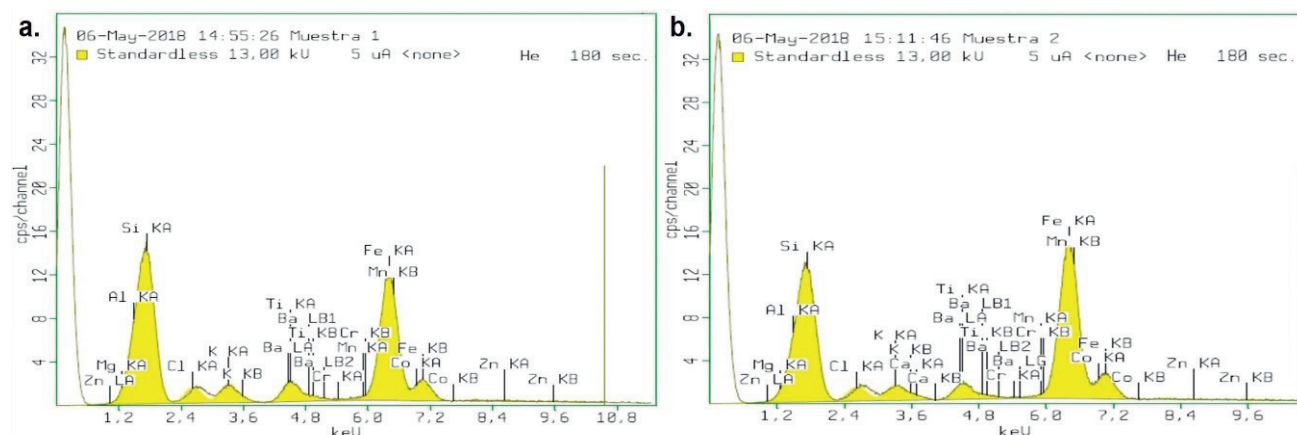


Figura 3. Espectros de fluorescencia de rayos X de polvos de arcilla.

a). Muestra 1 b). Muestra 2
Fuente: elaboración propia

Tabla 1.
Composición química de las muestras de arcilla en estudio

Muestra	Componente químico										
	(%)										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	TiO ₂	CuO	K ₂ O	MnO	Cl	MgO	BaO
Arcilla 1	29	61,8	4,57	0,05	0,9	0,03	1,3	0,09	1,1	0,5	0,3
Arcilla 2	22	56,1	12,7	0,08	1,3	0,01	2,5	0,19	2,8	0,9	0,4

Fuente: elaboración propia

Según lo reportado por Alvarado (1985), la relación molar de los óxidos de sílice y aluminio permite clasificar las arcillas, como caolinitas, ilitas o montmorillonitas. En este caso, la relación molar SiO₂/Al₂O₃ en ambas muestras es de 2:1, lo que las clasifica como arcillas montmorilloníticas. Este tipo de arcillas se caracterizan por estar químicamente compuestas por SiO₂ con porcentajes que varían entre 50 y 65 % y Al₂O₃ con participación entre 10 y 25 % (Bailey, 2013). En este caso, la muestra 1 contiene alúmina con un porcentaje superior al 25 %, sin embargo, no alcanza a clasificarse como una arcilla con propiedades refractarias, las cuales comprenden composiciones superiores al 40 % de óxido de aluminio (Díaz, 2015; Sánchez; Orozco; Peñaloza, 2014).

Por otro lado, se observa que los óxidos colorantes Fe₂O₃ y TiO₂, se presentan en concentraciones altas en la muestra de arcilla 2, con porcentajes de 12,7 para el óxido de hierro y 1,3 % para el dióxido de titanio. De acuerdo a lo anterior, cuando la contribución de ambos compuestos supera el 1 %, las arcillas no tendrán una tonalidad blanca después del proceso de sinterización, así como lo reportan Avgustinik (1983), Prada (2015) y Zuluaga *et al.* (2016). Al comparar los porcentajes hallados en la muestra 1 (4,57 % de Fe₂O₃ y 0,9 % de TiO₂), se puede afirmar que con la muestra de arcilla 2 se obtendrán tonalidades más rojizas en el producto final (Rodríguez; Rivera; Aza, 1999). Por tal razón, se selecciona la muestra 2 para la aplicación de Fe₂O₃, debido a que se requerirán menores concentraciones del óxido metálico para alcanzar las tonalidades rojas uniformes en la superficie y, por ende, representará un menor costo su aplicación.

Las arcillas reportaron la presencia de otros compuestos tales como K₂O, MnO, Cl, MgO y BaO, sin embargo, teniendo en cuenta su aporte, se caracterizan por ser trazas en el mineral arcilloso. Para el caso de los óxidos ZnO y CuO, su participación en ambas muestras es baja, por tal razón la aplicación de estos óxidos metálicos en las arcillas se realiza tanto en la muestra 1 como en la 2, y de esta forma observar su comportamiento.

Resultados y discusión

Análisis del color RGB

Aplicación de óxido de hierro (Fe₂O₃)

En la Figura 4, se observan cuatro probetas sinterizadas (a, b, c y d) con aplicación de óxido de hierro en concentraciones de 2, 4, 6 y 8 %, respectivamente. La arcilla utilizada como matriz del compuesto perteneció a la muestra 2 por contener la mayor concentración de este óxido. Así pues, se observa la influencia del óxido de hierro en la tonalidad rojiza de la superficie, comprobando lo descrito por Katsuki y Komarneni (2003), quienes también utilizaron polvos comerciales de Fe₂O₃ como pigmento cerámico en platos de porcelanas blancas.

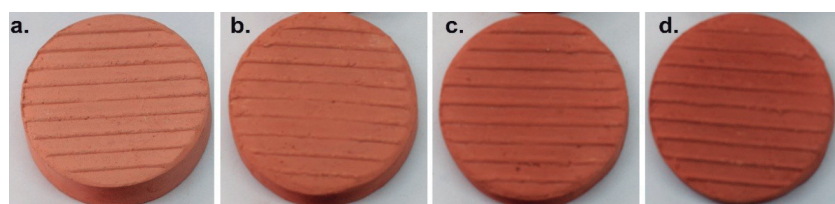


Figura 4. Probetas cerámicas sinterizadas con muestra 2 de arcilla y óxido de hierro.

a). 2 % Fe₂O₃ b). 4 % Fe₂O₃ c). 6 % Fe₂O₃ d). 8 % Fe₂O₃

Fuente: elaboración propia

Para determinar la coloración con mayor precisión, se realizaron histogramas de color RGB para las cuatro membranas con el software ImageJ (Figura 5). Este modelo de histograma se basa en la síntesis aditiva de los colores, lo que permite caracterizar un color en los tres colores primarios.

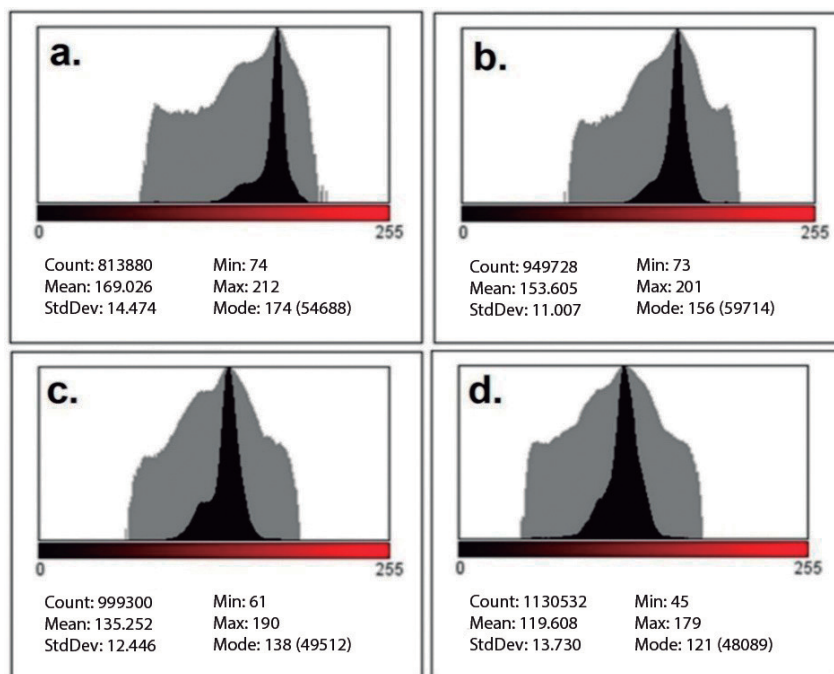


Figura 5. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.
a). 2 % de Fe_2O_3 b). 4 % de Fe_2O_3 c). 6 % de Fe_2O_3 d). 8 % de Fe_2O_3
Fuente: elaboración propia

Para el óxido de hierro se llevó a cabo el análisis RGB del canal rojo, debido a que es el canal saturado en los histogramas (Figura 5). Se observa que el parámetro *min* va disminuyendo a medida que la concentración del óxido aumenta, lo que conlleva hacia el oscurecimiento de dicho color. En los cuatro histogramas el color más oscuro lo reportó la membrana con 8 % de Fe_2O_3 (Figura 5d), ya que evidenció el parámetro *mode* más bajo con un valor de 121.

Aplicación de óxido de zinc (ZnO)

Debido a que las concentraciones de óxido de zinc reportadas por la fluorescencia de rayos X en cada una de las muestras no fueron representativas (no superan el 1 %), la aplicación de este óxido se realizó en ambas muestras. En la Figura 6 se presentan las membranas a, b, c y d, conformadas con la muestra de arcilla 1 en porcentajes de 1, 2, 3 y 4 % de pigmento, respectivamente, en donde se observa que con la aplicación de óxido de zinc se genera también una resistencia a la corrosión y a los rayos UV, según lo reportado por Kiomarsipour; Razavi; Ghani y Kioumarsipour (2013).

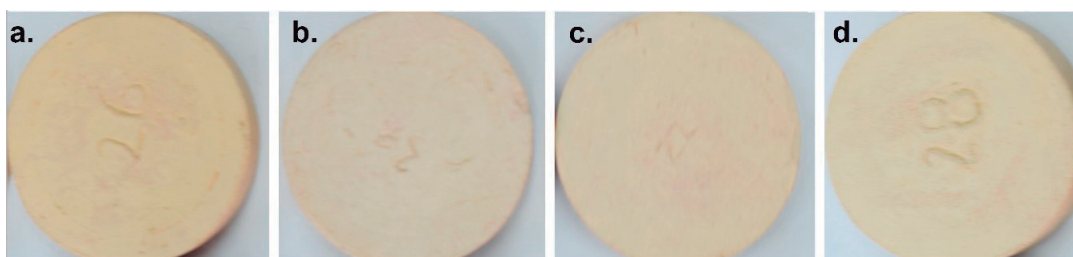


Figura 6. Probetas cerámicas sinterizadas con muestra 1 de arcilla y óxido de zinc.
a). 1 % ZnO b). 2 % ZnO c). 3 % ZnO d). 4 % ZnO
Fuente: elaboración propia

Los histogramas de color RGB para las cuatro membranas de la Figura 6 se presentan en la Figura 7.

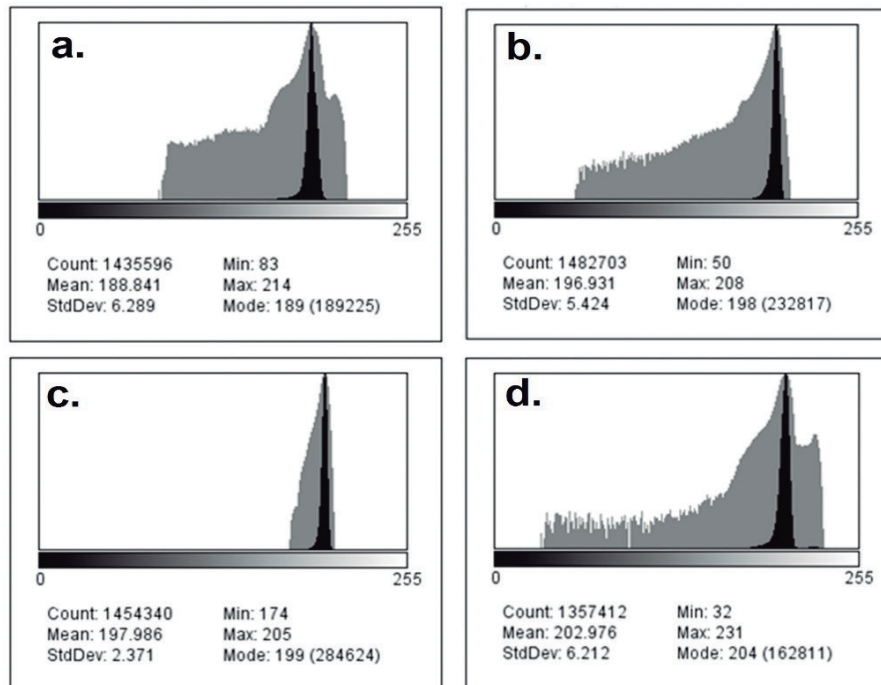


Figura 7. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.

a). 1 % de ZnO b). 2 % de ZnO c). 3 % de ZnO d). 4 % de ZnO

Fuente: elaboración propia

Para el óxido de zinc, el análisis RGB indispensable pertenece al canal blanco, debido a que es el canal saturado. Para las membranas de la Figura 6, los histogramas muestran que el parámetro *mode* incrementa de forma proporcional a la concentración del óxido, es decir, los picos de cada curva se acercan cada vez más al color blanco (referencia *mode*: 255). De los cuatro histogramas el color más claro con tendencia al blanco opaco lo reportó la muestra con 4 % de zinc (Figura 7d) con un parámetro *mode* de 204 (el más cercano a 255).

En la Figura 8 las membranas a, b, c y d, representan las membranas elaboradas a partir de la arcilla 2 con porcentajes de ZnO de 1, 2, 3 y 4 %, respectivamente. A simple vista se puede notar que la muestra 2 no presentó las mismas tonalidades que las membranas de la muestra 1, siendo que en ambas se manejó la misma concentración de pigmento. Esto es debido al alto contenido de Fe_2O_3 de la muestra 2, demostrando su influencia como óxido generador de una alta tonalidad rojiza con mayor dificultad de modificar.

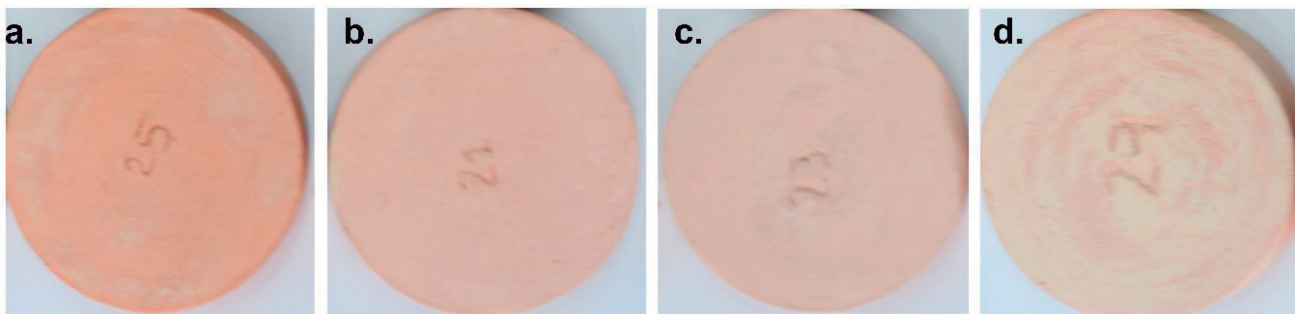


Figura 8. Probetas cerámicas sinterizadas con muestra 2 de arcilla y óxido de zinc.

a). 1 % ZnO b). 2 % ZnO c). 3 % ZnO d). 4 % ZnO

Fuente: elaboración propia

Los histogramas de color RGB se muestran en la Figura 9 para las cuatro membranas de la muestra 2, de la Figura 8. Al igual que en la muestra 1, los histogramas reportan un parámetro *mode* que aumenta proporcionalmente con la concentración del óxido, los picos de cada curva se acercan al color blanco con una menor intensidad. El color más claro hallado en las muestras lo exhibe el 4 % de óxido de zinc con un parámetro *mode* de 200 (el más cercano a 255).

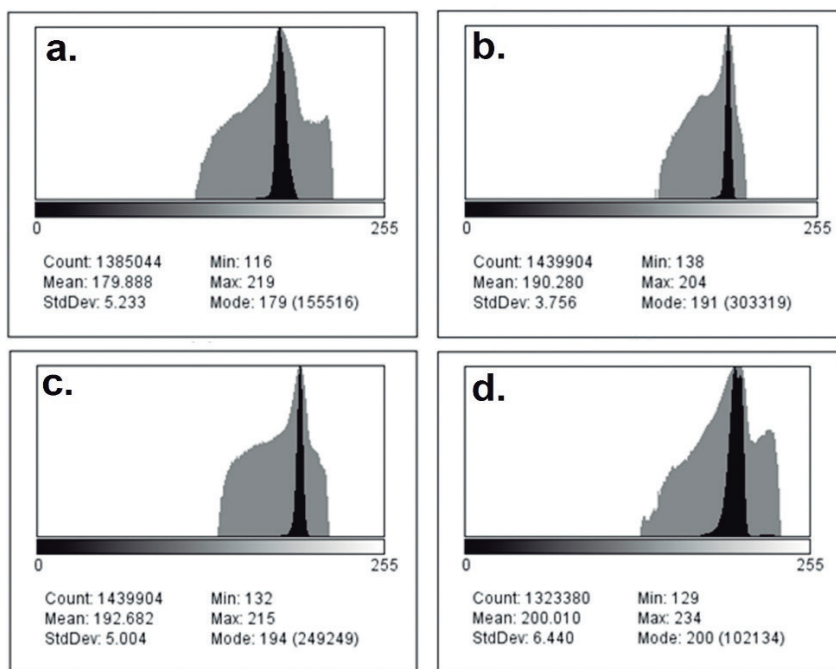


Figura 9. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.
a). 1 % de ZnO b). 2 % de ZnO c). 3 % de ZnO d). 4 % de ZnO
Fuente: elaboración propia

Aplicación de óxido de cobre (CuO)

Las membranas presentadas en la Figura 10 representan las probetas elaboradas a partir de las muestras de arcillas 1 y 2 con una concentración de 4 % de CuO. De acuerdo al trabajo realizado por Gargori; Galindo; Llusar; Fas y Monrós (2014), adiciones de óxido de cobre entre el 3 % y el 5 % logran modificar la tonalidad de materiales arcillosos, así como incrementar de forma favorable su absorción y conductividad eléctrica, como también su conductividad térmica (Cheng; Chai; Zhang, 2014). Se observa que la probeta elaborada a partir de la muestra de arcilla 2 resultó con una tonalidad café más fuerte con la misma cantidad de pigmento que la probeta elaborada con la muestra de arcilla 1. Este cambio puede ser atribuido al alto contenido de Fe_2O_3 en esta arcilla, el cual favorece este tipo de tonos.

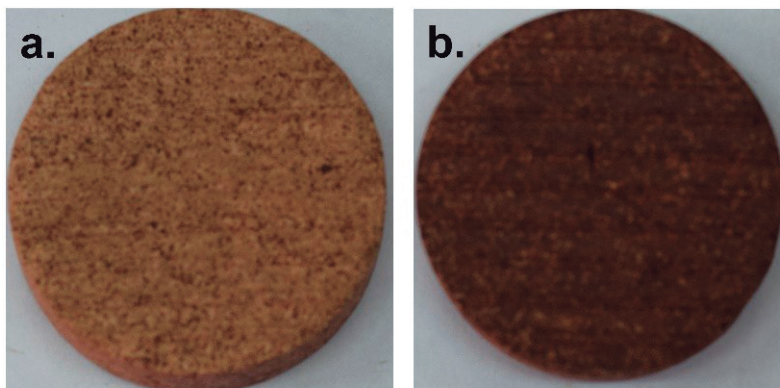


Figura 10. Probetas cerámicas sinterizadas con ambas muestras de arcilla y óxido de cobre.
a). Muestra 1 de arcilla y 4 % CuO b). Muestra 2 de arcilla con alto contenido de Fe_2O_3 y 4 % CuO
Fuente: elaboración propia

Los histogramas de color RGB para las membranas de la muestra 1 y 2 se presentan en la Figura 11. Para el óxido de cobre (CuO) el análisis RGB se llevó a cabo con el canal rojo y azul, debido a que son los colores primarios para formar el tono café. Al comparar los dos histogramas del canal rojo, se evidencia que la media o parámetro *mode* de la membrana de la muestra 2 (figura 11c) tiende más hacia la izquierda, es decir, hacia el color negro, reportando un *mode* de 54. Por otro lado, en la muestra 1 obtuvo 99 (Figura 11a), un valor que se ubica más lejos del 0 de referencia. De igual manera sucedió con el canal o color azul de las dos muestras, en donde la muestra 2 (Figura 11d) se encuentra más próxima al color negro de referencia (*mode* 20) que la muestra 1 (Figura 11b) la cual obtuvo un valor de 42.

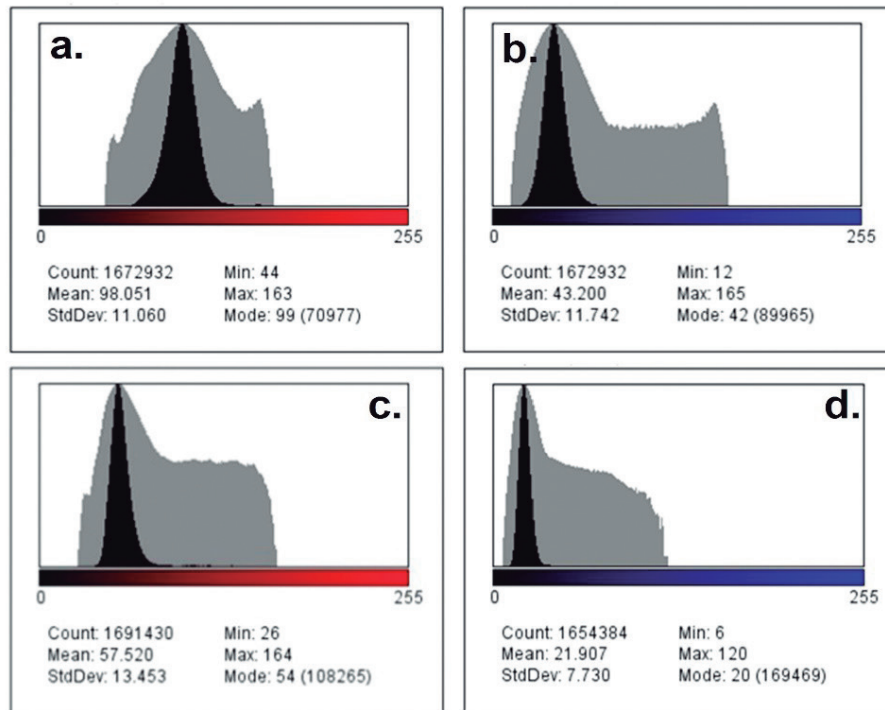


Figura 11. Histogramas de color RGB de probetas cerámicas sinterizadas.

a-b). Canales rojo y azul muestra 1 con 4 % CuO

c-d). Canales rojo y azul muestra 2 con 4 % CuO

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Es posible utilizar óxidos sintéticos para dar color a los materiales cerámicos, ayudando a la creación de nuevos productos y facilitando innovación dentro del sector alfarero, así como en la estandarización de sus materias primas y productos finales.

Con la utilización de óxidos se puede transformar la tonalidad de arcillas comunes, sin embargo, es necesaria la caracterización de las materias primas por ser la parte fundamental del proceso. Su composición química influye de manera significativa en la elección de los óxidos y cantidades a adicionar del mismo para generar gamas de tonalidades diferentes.

La aplicación de óxidos influye en los procesos de sinterización de los materiales cerámicos, teniendo en cuenta que puede remplazar la práctica de aumento de temperaturas y de prolongación del tiempo de cocción y, de esta forma, reducir los tiempos del proceso.

El óxido de zinc genera una nueva gama de tonalidades claras para las arcillas comunes, lo cual permite la fabricación de tabletas y ladrillos para fachada de este color. Estos productos hoy en día son muy utilizados en la construcción de viviendas y en su mayoría solo pueden ser fabricados a partir de arcillas especiales como caolines.

Para lograr colores y texturas ocre llamativas para los clientes se debe realizar la aplicación de óxido de cobre, cuya tonalidad varía según la arcilla utilizada y el contenido de otros óxidos como el óxido de hierro.

Referencias

- Alvarado, A. (1985). *El origen de los suelos*. (No. 24). Provincia de Cartago, Turrialba, Costa Rica: Serie materiales de enseñanza/ Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza CATIE.
- Amado, S., Villafrades, N.; Tuta, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 78(167), 50-58.
- Anderson, J. C. (1886). *U.S. Patent No. 348,443*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- ASTM International. (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. (ASTM C. 702/C702M-11).
- Avgustinik, A. (1983). *Cerámica*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Bailey, S. (2013). *Clays and Clay Minerals*. Kent: Elsevier Science.
- Betancourt, D.; Martirena, F.; Day, R.; Diaz, Y. (2007). Influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja. *Revista Ingeniería de Construcción*, 22(3), 187-196. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732007000300005>
- Cheng, Q.; Chai, J.; Zhang, Z. (2016). Investigation of double-layer coating pigmented with CuO particles of different concentrations on aesthetic and thermal aspects. *International Journal of Thermal Sciences*, 105, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.02.010>
- Díaz, J. S. (2015). *Fabricación de mulita a partir de alúmina y sílice mediante molienda y variación en la composición Química* (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro., México.
- Fernández, C. A. (1998). Fabricación de ladrillos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 4(1), 9-12. Recuperado de: <http://revista.agro.unlp.edu.ar/index.php/revagro/article/view/729>
- Gargori, C.; Galindo, R.; Llusar, M.; Fas, N.; Monrós, (2014). Pigmentos cerámicos de alta absorción y conductividad térmica para colectores solares. Congreso Nacional de Medio ambiente. Universitat Jaume I, España.
- Gippini, E. (1966). Mecanismo químico de la formación del color en los ladrillos. *Materiales de construcción*, (123), 50-62. <https://doi.org/10.3989/mc.1966.v16.i123.1704>
- González, F.; García, G. (1966). Arcillas cerámicas de Andalucía III. Yacimientos terciarios de la margen derecha del Guadalquivir en la provincia de Sevilla. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 5(2), 229-245.
- Guerrero, G.; Espinel, E.; Acevedo, S.; Guillermo, H. (2017). Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Tecnura*, 21(51), 118-131. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a09>
- ICONTEC. (2009). NTC 4205-1. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos: parte 1: mampostería estructural / ICONTEC.
- Katsuki, H.; Komarneni, S. (2003). Role of α -Fe₂O₃ morphology on the color of red pigment for porcelain. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(1), 183-185. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03300.x>

- Kiomarsipour, N.; Razavi, R. S.; Ghani, K.; Kioumarsipour, M. (2013). Evaluation of shape and size effects on optical properties of ZnO pigment. *Applied Surface Science*, 270, 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.167>
- Monrós, G.; Badenes, A.; García, A.; Tena, A. (2003). *El color de la cerámica: Nuevos mecanismos en pigmentos para los nuevos procesados de la industria cerámica* (Vol. 11). Castellón, España: Publicacions de la Universitat Jaume I.
- Prada Orgaz, F. (2015). *Estudio, desarrollo y aplicación de los óxidos de hierro de la mina 'Santa Rosa' para su uso industrial como pigmento* (Tesis doctoral). Universidad de Oviedo, España.
- Prieto, L. F. M. (2010). Alfarería y urbanismo. Los chircales de Santafé (hoy Bogotá) y su impronta en la arquitectura y el desarrollo urbano de la ciudad colonial. *Nodo: Arquitectura. Ciudad. Medio Ambiente*, 4(8), 31-58.
- Quijano, B.; Díez-Silva, H. M.; Montes-Guerra, M. I.; Castro-Silva, H. F. (2014). Implementación de procesos sostenibles vinculando industrias regionales: Reciclaje de residuos siderúrgicos como proyecto de cambio de la mampostería en Boyacá-Colombia. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (77), 82-103. <https://doi.org/10.21158/01208160.n77.2014.817>
- Roa-Bohórquez, K. L.; Paredes-Roa, R. A.; Lara-González, L. Á. (2018). Aplicación de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 35-49. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a2>
- Rodríguez, G. P.; Rivera, F. G.; Aza, S. (1999). Obtención industrial de materiales cerámicos a partir de lodos rojos del proceso Bayer. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 38(3), 220-226. <https://doi.org/10.3989/cyv.1999.v38.i3.962>
- Rojas Torres, M. A.; Carreño Dueñas, D. A.; Gómez Ángel, S. M. (2015). Reconversión tecnológica en el sector productivo artesanal de hornos de ladrillo y cal para reducir la contaminación atmosférica en el valle de Sogamoso (Boyacá, Colombia). *Virtualpro*, 167, 1-17.
- Sánchez, J.; Orozco, J. A.; Peñaloza, L. (2014). Evaluación de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos refractarios que sirvan para la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en Norte de Santander. *Revista de Investigación de la Universidad del Quindío*, 25(1), 57-64.
- Simbaquera, L. (1958). *Apuntes lexicográficos sobre a industria del ladrillo en Bogotá*. Bogotá, Colombia: Tesauros.
- Torres, P.; Hernández, D.; Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), 145-154. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000300003>
- Zuluaga, D.; Henao, A. P.; García, D. F.; Rodríguez, J. E.; Hoyos, Á. M.; López, M. E.; Gómez, C. (2016). Caracterización térmica, química y mineralógica de un tipo de arcilla roja propia de la región andina colombiana, empleada para la producción de ladrillos para construcción. *Revista Colombiana de Materiales*, 9, 53-63.