

RELEVANCIA DEL FACTOR “MATERIA PRIMA” EN UN PROCESO CERAMICO INDUSTRIAL: UN CASO DE ESTUDIO VENEZOLANO

THIERRY POIRIER¹, JOSÉ BAENA², CARLOS PICARDO³, XAVIER HUNG³

¹ Grupo de Ingeniería de Superficies, Universidad Simón Bolívar. AA 89000, Caracas 1080a, Venezuela, tpoirier@usb.ve

² Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar, jbaena@usb.ve

³ Laboratorio de Procesos Cerámicos, Universidad Simón Bolívar,
piccardocarlos@yahoo.com , xavierhung@hotmail.com

Recibido: septiembre 2013

Recibido en forma final revisado: mayo 2014

RESUMEN

Frente a los problemas de calidad experimentados en producción por muchas empresas cerámicas venezolanas, una de las respuestas consiste en realizar, en los diversos sectores de las minas proveedoras, un análisis no solamente de la composición química o de la granulometría de la materia prima, sino también de las propiedades más relevantes involucradas en el proceso productivo. Al identificar y discriminar zonas o “clusters” de propiedades similares dentro de la mina, y al determinar correlaciones satisfactorias entre la composición y dichas propiedades, es factible anticipar el impacto de cualquier lote que ingrese a la planta, ajustar su efecto en el proceso productivo y prevenir las variaciones que generan pérdidas de producción o de calidad. El presente estudio de caso aplica los aspectos mencionados a los parámetros claves de una planta productora de baldosas que recurre a una sola mina de arcilla. Los resultados confirman claramente el peso del factor Materia Prima en las pérdidas de calidad y ratifican el carácter obligatorio de políticas técnicas y gerenciales apropiadas, tales como la zonificación de la mina, la homogenización de la materia prima y/o el ajuste oportuno de los parámetros de trabajo en el proceso.

Palabras clave: Mina, Arcilla, Composición, Propiedades, Proceso.

RELEVANCE OF THE RAW MATERIAL FACTOR IN A CERAMIC INDUSTRIAL PROCESS: A VENEZUELAN CASE-STUDY

ABSTRACT

In order to respond to quality issues experimented in Venezuelan ceramic companies, the chemical and granulometric analysis of raw material should be combined with the measurement of its most relevant processing properties. By identifying “clusters” inside the mine with similar properties and finding reliable correlations between composition and these properties, the impact of any incoming batch may be anticipated, and it is possible to regulate its effect in the process and avoid excessive changes that cause production and quality losses. The present case study applies this principle to the key parameters of a tile making plant that uses one single clay mine. The results clearly show the strong effect of the raw material factor on the quality losses and confirm the compulsory nature of appropriate technical as well as managerial policies, such as zoning or homogenization of raw material in the mine and/or timely adjustment of working parameters in the process.

Keywords: Mine, Clay, Composition, Properties, Process.

INTRODUCCIÓN

Es conocido que las variaciones de composición de la materia prima procedente de una mina, pueden afectar la regularidad en las características y propiedades del producto final. En efecto, tanto los cristales presentes

como su tamaño y su química, tendrán repercusiones sobre cada una de las etapas del proceso. Sin embargo, no todos los industriales del sector cerámico venezolano realizan estudios formales para cuantificar esta influencia. Incluso cuando se caracteriza de manera exhaustiva y sistemática la materia prima que llega a la planta, el énfasis no es

siempre dado al estudio causa-efecto, y la postura más corriente consiste en asumir especificaciones de rangos de composición, más sustentadas en la experiencia empírica que en el efecto cuantitativo documentado de las variaciones de dicha materia prima sobre los parámetros de producción. Cuando la empresa se limita a los ensayos más básicos sobre su materia prima (residuo sobre malla 325, plasticidad, propiedades de cocción), el efecto de tales variaciones es a menudo supuesto de manera meramente intuitiva y a veces, simplemente, ignorado en la toma de decisiones.

Por ello, se suele sufrir los efectos de la entrada de una materia prima variable sobre los parámetros claves de producción, con escasas posibilidades de prevenirlos y con muchas dificultades para compensarlos. En el caso de la producción de baldosas, se pueden mencionar como parámetros claves:

- La fluidez de la pasta, su molturabilidad.
- La permeabilidad de la mezcla y su efecto en la humedad de los gránulos de atomización y de las baldosas al salir del secadero.
- La plasticidad de la mezcla y su efecto en el módulo de rotura en crudo y en seco de las piezas prensadas.
- El comportamiento en el horno, reflejado entre otros por la absorción de agua y la contracción de quema.

Estas dos últimas características son especialmente importantes ya que reflejan el tipo de producto final (Tabla 1) y el tamaño o “calibre” del mismo.

Las fallas de productividad y de calidad, y con ellas las pérdidas económicas, son una consecuencia de esta variación poco entendida y/o ignorada de las características de la mina.

Tabla 1. Clasificación de baldosas prensadas en función de su absorción de agua y tolerancias dimensionales en longitud, según la Norma COVENIN 1466-2003

Categoría	Absorción de agua	Variación dimensional aceptable
B1a	< 0,5%	± 0,50-0,75%
B1b	0,5-3%	± 0,50-0,75%
BIIa	3-6%	± 0,50-0,75%
BIIb	6-10%	± 0,50-0,75%
BIII	> 10%	± 0,25-0,50%

Terrazas: Una modalidad preventiva adoptada por varias plantas, consiste en realizar terrazas de homogenización: se apilan y apisonan, por medio de una niveladora de orugas,

capas de diversos lotes de materia prima de la misma mina. Al extraer una parte de estas terrazas con una pala mecánica, se consigue una mezcla que permite compensar las variaciones de composición entre estas capas y, a su vez, reducir sus repercusiones en el proceso de fabricación. La Figura 1 ilustra este principio: una variación de aprox. 5% en el %SiO₂ en los camiones de arcilla, puede verse reducida a 0,5% al llegar al molino de preparación de pasta, gracias a las terrazas.

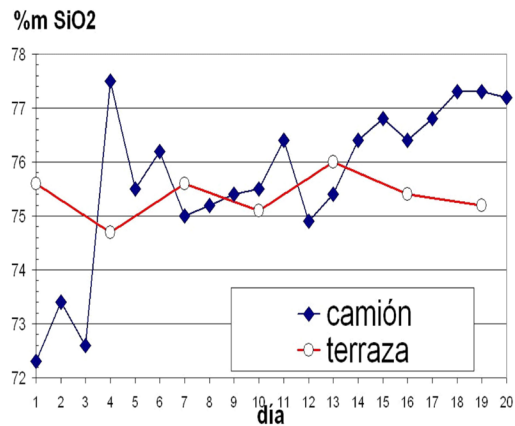


Figura 1. Variabilidad comparada del porcentaje de SiO₂ en una arcilla íltica que llega por camiones a una planta de baldosas, con la misma arcilla apilada en terrazas de homogenización (Poirier et al. 2002)

Alerta temprana: Otra modalidad consiste en anticipar el impacto en producción de la variación de composición de la materia prima entrante, y preparar cada etapa del proceso para compensar de antemano el efecto de cualquier cambio relevante que llegase a ocurrir. Por ejemplo, a nivel del molino, la entrada oportunamente informada de una materia prima más rica en desgrasante, hace prever la necesidad de un mayor tiempo de molienda y un consumo diferente de defloculante. A su vez, permite anticipar un material más permeable y más fácil de secar en el atomizador, por lo que la temperatura y el caudal de aire habrían de ser reducidos para conservar una humedad aceptable en los gránulos de prensado. El éxito de esta estrategia preventiva supone que la gerencia asuma el desafío de aumentar la frecuencia y celeridad de los ensayos de control en producción, así como el seguimiento y la implementación de los medios para una transmisión efectiva de la información entre las etapas de producción. Las entrevistas realizadas por los autores a numerosos operadores y supervisores en varias plantas venezolanas de baldosas, han mostrado que la comunicación preventiva (“alerta temprana”) representa una de sus principales aspiraciones organizacionales, como herramienta para ahorrar trabajo y ganar eficiencia.

Esta estrategia de visibilidad entre etapas, centralizada desde la gerencia técnica o el laboratorio de control, puede incluir las tradicionales pizarras, pero su eficiencia es mejorable mediante sistemas de transmisión actualizados con frecuencia, tales como avisos eléctricos (“Andon”), electrónicos, radiales y/o digitales (Liker, 2006; Laborie *et al.* 2005) que permiten una reacción rápida y apropiada en las etapas potencialmente afectadas. Paradójicamente, la implementación de una plataforma moderna, que se apoye en teléfonos inteligentes de tipo Blackberry, Symbian, iOS o Android, podría resultar relativamente económica, por ser disponibles en la indumentaria personal de numerosos operadores y supervisores de las plantas consideradas. Un merito adicional es la posible integración a un sistema SAP de toda la información enviada (Fan, 2008; Engfors, 2011).

Zonificación y Ajustes: Existe una alternativa de costo similar o menor a las soluciones anteriores: habiendo caracterizado correctamente la mina y sus variaciones de composición y propiedades (cualquier sea su alcance), se mezclan lotes escogidos para ajustar sus propiedades a un rango aceptable. Este enfoque es semejante al control predictivo de proceso planteado por Funk & Dinger (1994, 1997). Una primera opción, similar a la terraza aunque de alcance más limitado, consiste en mezclar dos lotes en la misma mina, mediante un buldózer: es relativamente productiva y es frecuentemente empleada en la industria alfarera, pero implica una homogeneidad limitada del material. Otra opción, a veces más económica aún, se aplica en la planta, realizando simplemente una discriminación de lotes de la misma mina, y colocándolos en diferentes áreas del patio de materias primas como si procedieran de minas distintas. El costo de este movimiento de tierra en la mina o de esta discriminación en planta, puede verse compensado por el mayor número de piezas de primera calidad al final del proceso.

En ambos casos, la gerencia técnica puede estimar el efecto de la composición de las materias primas (a menudo cuantificable mediante estudios de correlación) sobre los parámetros del proceso, y deducir las cantidades idóneas de los diversos lotes. Para ello, se emplean combinaciones lineales de los lotes, suponiendo la validez de una ley de aditividad.

$$P = \sum P_i \times C_i \quad (1)$$

donde: P_i es la propiedad de cada lote i , y c_i su proporción.

Este postulado, en mezclas de arcillas, resulta completamente viable en características intrínsecas como la granulometría,

la superficie específica o la pérdida al fuego. Asimismo, es relativamente efectivo en muchas propiedades de proceso tales como la contracción de secado o de quema (Poirier, 2005; Vargas, 2002; Carbonell, 2010), aunque encuentra límites en el cálculo de otras propiedades complejas, tales como plasticidad o módulo de rotura (Pesantes 2000). Esta técnica ha sido empleada en empresas de vajilla y electroporcelana, permitiendo la optimización del proceso (Funk *et al.* 1997). Al respecto, se observa que las mezclas de materiales con naturalezas y tamaños muy diferentes (por ejemplo: desgrasantes con arcillas) son propensas a derogar la validez de esta ley de aditividad (Poirier, 2005). En el presente trabajo, se estudia una mina de arcilla utilizada por una planta venezolana de baldosas, como única fuente de materia prima para su proceso de fabricación: además de caracterizar su geología y la variabilidad de composición de dicha mina, se evalúa el grado de variación reflejado en las propiedades más relevantes del proceso de fabricación, así como la factibilidad de aplicar mezclas de ajuste entre los lotes más dispares.

MARCO EXPERIMENTAL

Se tomaron diferentes muestras de un yacimiento a cielo abierto del estado Miranda (Venezuela), destinado para la explotación de arcilla, el cual consta de 20 hectáreas aptas para la actividad minera, con el fin de evaluar sus propiedades químicas y físicas. Se realizó la zonificación del yacimiento con el apoyo de una imagen satelital, mostrada en la Figura 2a.

Una identificación previa de las principales fases cristalinas presentes, fue realizada sobre una mezcla de lotes de la misma mina, mediante difracción de rayos X (Philips PW1840, $\text{CuK}\alpha$, $0,02^\circ/\text{s}$). El análisis hecho sobre la materia tal como es recibida y después de un proceso de separación de la fracción arcillosa por centrifugación, aportó una información general sobre los tipos de mineral presentes.

Posteriormente y tal como se muestra en la Figura 2b, se procedió a una toma de muestras, tratando de cubrir toda el área de estudio. Para establecer la ubicación exacta de cada muestra, se utilizó un dispositivo de posicionamiento global (GPS) marca Garmin, modelo Nuvi 255.

La distribución granulométrica de cada muestra se determinó mediante granulometría láser (Malvern MasterSizer Micro, MAF 5000), colocando polvo tal como recibido en un beaker de 600 ml bajo agitación mecánica y ultrasónica hasta alcanzar una turbidez aceptada por el equipo. Su análisis químico fue realizado por fluorescencia de rayos X (equipo Thermoelectron Corp. ARL9900xp). Se realizaron

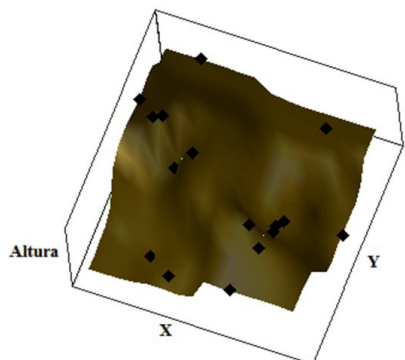
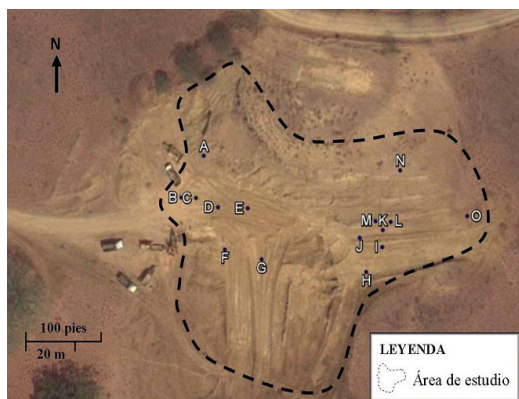


Figura 2. (a) Imagen satelital del yacimiento de arcilla y (b) Ubicación relativa de las muestras dentro del área de estudio

las respectivas curvas de defloculación con tripolifosfato de sodio (Tripoliven) en suspensiones acuosas de densidad $1,58 \pm 0,02$ kg/L, midiendo (en función de la cantidad de defloculante) la viscosidad con un viscosímetro Brookfield, modelo DVE, a una velocidad de 20 rpm. De esta manera, se determinó la viscosidad mínima alcanzada y el respectivo consumo de defloculante.

Seguidamente, estas muestras fueron secadas, granuladas con un tamiz No. 35, y el pasante, previa humidificación ($6\% \pm 1\%$) con un rociador de agua, fue prensado (Gabrielli, 90 ± 10 kg/cm²) en placas de 12 x 5 x 0,5 cm, antes de ser secadas en una estufa y cocidas a 1100 °C (ciclo de 50 minutos frío-frío) en el horno (SITI) de rodillos de una planta de baldosas. La contracción lineal de cocción, así como la absorción de agua, se determinaron según lo establecido en las normas ASTM C326-03 y ASTM C373-88. Finalmente, para complementar estos estudios, se comparó visualmente el color de quema de las placas con los patrones de escala de Munsell, bajo luz natural.

RESULTADOS Y DISCUSION

Una revisión de los datos geológicos permite anticipar los tipos de minerales esperados. El área de estudio corresponde

a la Formación Tuy de probable edad Plioceno-Pleistoceno, comprendiendo unidades claramente distribuidas a lo largo y ancho de la Cuenca Tuy. Orta (2003) señala que dicha formación abarca un área aproximada de 250 km², comprendiendo las áreas de Santa Lucía, Santa Teresa, Ocumare del Tuy, Cúa, Charallave y la región de Suapire. Esta formación corresponde al 75 % de la denominada Cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy y con extensión en dirección NE-SO. En la Formación Tuy, una subunidad fue definida por Smith (1952) como Conglomerado Pichao. Más tarde, Picard & Pimentel (1968) elevaron el rango de la unidad a Miembro Pichao, con una longitud aproximada de 17,5 km y abarcando una extensión de 11 km², aflorando en la parte norte de la Cuenca Tuy (Figura 3). La Formación Tuy corresponde a una unidad sedimentaria poco consolidada de intercalaciones de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados. Según Picard & Pimentel (1968), estas gravas observadas en el microscopio petrográfico sugieren altos contenidos de carbonatos (30-40 %), cuarzo (5-25 %) y clorita (2-10 %), así como porcentajes bajos de muscovita y feldespatos (alcalinos y sódico-cálcicos). Asimismo, estos autores identificaron guijarros de rocas de origen metamórfico, tales como esquistos cuarzo-micáceos, esquistos cloríticos y rocas afáníticas ferromagnesianas de composición; cuarzo (5-25%), ftanita, clorita (2-10 %), además de porcentajes bajos de muscovita y feldespato (alcalino y sódico-cálcicos). Las secuencias de la Formación Tuy se caracterizan por presentar arcillas y lutitas normalmente calcáreas e incluso margosas, Picard & Pimentel (1968) sugieren que estas arcillas al hidratarse transmiten propiedades plásticas (material montmorillonítico).

El Miembro Pichao se caracteriza por la presencia de conglomerados de peñones de rocas metamórficas provenientes de las formaciones las Mercedes y Chuspita. El estudio petrográfico realizado para este miembro (Picard & Pimentel 1968) destaca la presencia de esquistos cuarzo-micáceos, esquistos calcáreo-cuarzo-piríticos, filitas grafitosas, calcita ferruginosa y caliza microgranular.

El estudio de difracción de rayos X (Figura 4) muestra una arcilla ilito-caolinítica con impurezas microscópicas de talco (clorita) y desgrasantes ricos en cuarzo. Esta composición de fases es concordante con la Formación Tuy. Al respecto, Picard & Pimentel (1968) realizaron análisis de difracción de Rayos X en muestras de diferentes áreas tomadas en la Formación Tuy. Los resultados observados en la muestra total sugerían asociaciones de montmorillonita-cuarzo-caolinita y en las separadas por el tamiz 325 reportaron montmorillonita, ilita, caolinita y sepiolita. El material retenido incluía cuarzo-calcita y cuarzo-albita. En cambio,

la muestra analizada en el presente estudio no presenta montmorillonita, sepiolita ni material carbonático. En términos de aplicación, estos resultados sugieren un tipo de arcilla apto en la industria de baldosas por su plasticidad correcta y su carácter vitrificante (Impiva, 2004). Este carácter vitrificante se ve corroborado por el estudio de fluorescencia de rayos X, con los porcentajes de hierro y alcalinos reflejados en las Tablas 2 y 3.

Los óxidos mayoritarios determinados en el estudio de las muestras son SiO_2 y Al_2O_3 . Dichos elementos son parte de la composición química de los minerales presentes, representando fracciones siliciclásticas.

La relación de estos minerales indica la variación entre arcillas, lutitas y areniscas en la Formación Tuy, siendo el contenido de Al_2O_3 característico de los minerales de arcilla. En este caso comprenden la composición de la caolinita e illita. Minerales del grupo de la clorita fueron identificados en la muestra, aunque como elementos minoritarios. Dicha asociación mineralógica corresponde claramente a los contenidos medidos de Fe_2O_3 y MgO . La clorita es un mineral distintivo de una facies metamórfica de baja presión/temperatura, por lo que se puede inferir que pertenece a los conglomerados de peñones de rocas metamórficas esquistosas y de color verde del Miembro Pichao.

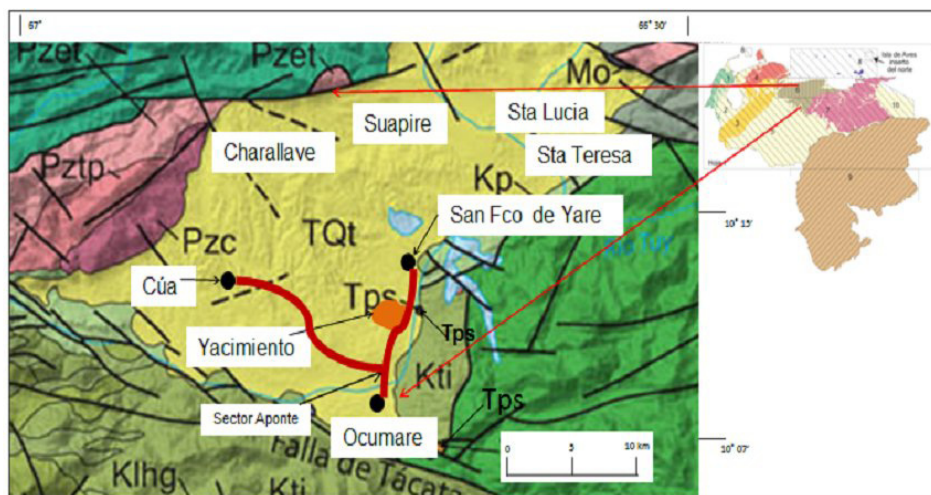


Figura 3. Mapa geológico del área estudiada (Tomado de Hackley et al. 2006). *Legenda:* Rocas sedimentarias y Volcánicas: TQt: Tuy Siquire (Plioceno a Holoceno), Tps: Rocas sedimentarias (Paleoceno); Rocas metamórficas e intrusivas: Kp: Paracotos Filita (Cretácico tardío), Klhg: Loma de Hierro, Gabro (Cretácico), Mo: Rocas ultramáficas (Mesozoico), Pzet: El Tinaco Complejo (Paleozoico), Pztp: Tucutunemo Filita (Paleozoico), PZc: Charallave (Paleozoico)

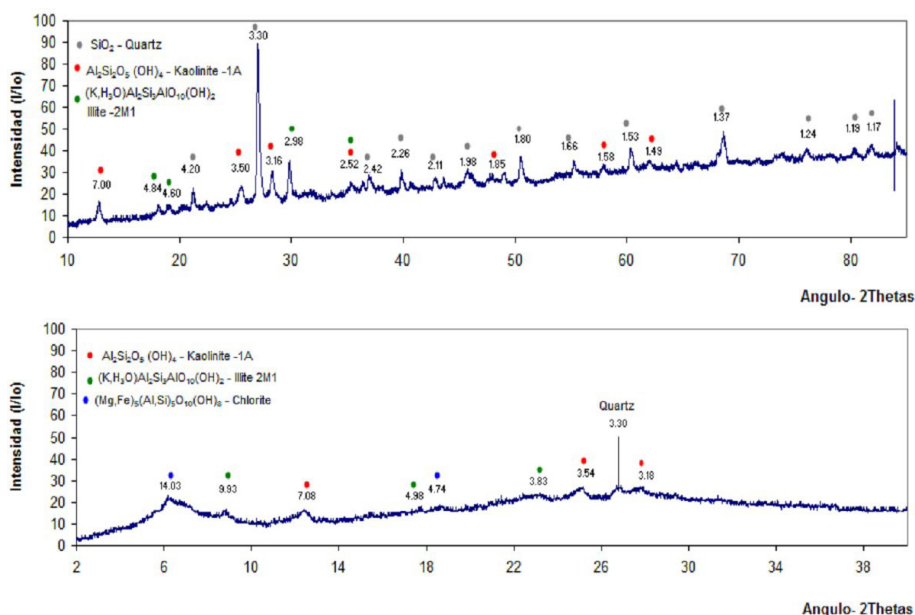


Figura 4. Difracción de rayos X

(a) sobre la materia prima como fue recibida, (b) sobre la fracción arcillosa separada por centrifugación

Tabla 2. Composición medida por fluorescencia de rayos X y pérdida al fuego (P.F) de las muestras de arcilla

	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%SO ₃	%K ₂ O	%Na ₂ O	%Mn ₂ O ₃	%TiO ₂	P. F
A	55,1	14,0	7,6	7,2	2,6	0,07	1,09	1,96	0,20	0,84	9,1
B	52,6	16,7	9,7	3,6	3,6	0,09	1,14	2,81	0,19	1,05	7,6
C	52,5	14,9	7,9	7,1	2,8	0,09	1,46	1,53	0,17	0,93	9,4
D	50,4	15,5	8,5	7,3	2,9	0,08	1,40	1,58	0,18	0,95	9,3
E	51,4	16,5	9,5	5,1	3,2	0,07	1,37	1,7	0,22	1,04	8,8
F	53,1	16,4	9,2	4,4	3,3	0,08	1,08	2,64	0,19	0,98	8,3
G	50,9	16,6	9,5	4,6	3,2	0,07	1,34	1,88	0,20	1,04	10,4
H	52,2	15,9	8,6	6,3	2,8	0,08	1,49	1,62	0,21	1	9,1
I	48,4	17,8	10,7	3,4	3,7	0,06	1,44	1,84	0,22	1,15	9,9
J	49,6	17,5	10,5	4,4	3,7	0,08	1,32	1,78	0,22	1,13	8,6
K	51,8	17,2	10,3	3,7	3,6	0,08	1,32	1,62	0,19	1,11	8,3
L	49,5	16,8	10,0	4,5	3,5	0,07	1,37	1,62	0,19	1,08	11,2
M	48,3	17,3	10,1	4,0	3,7	0,07	1,40	1,73	0,22	1,17	10,2
N	55,6	15,0	8,5	4,2	3,2	0,07	0,92	2,67	0,19	0,94	9,2
O	49,5	13,8	6,9	10,7	2,5	0,08	1,19	1,62	0,18	0,81	12,3

Tabla 3. Diferencia porcentual máxima de composición y pérdida al fuego (P.F) entre los lotes A-O

%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / SiO ₂	Colorantes	Alcalinos	Alcalinotérreos	%SO ₃	P.F
7,3	4,0	0,11	4,2	1,1	6,0	0,03	4,71

Estos cantos provienen de las formaciones Las Mercedes, Chuspita y Las Brisas ubicadas hacia el norte de Suapire y Santa Lucía (Picard & Pimentel 1968). La Formación Tuy en general presenta litología areno-arcillosa con cemento calcáreo el cual es evidenciado con la presencia de CaO determinado en la fluorescencia de rayos X (Tabla 3); sin embargo, en la difracción de rayos X, ningún mineral con contenido carbonático es reportado. Ello no descarta que en futuras mediciones a otras muestras éstos no sean encontrados.

Cabe destacar que la composición de óxidos en la mina, presenta variaciones que se pueden considerar de medianas a altas. El término “mediana” se evoca en comparación con análisis realizados en otras plantas con otras minas arcillosas venezolanas. Es de notar, sin embargo, que algunas concentraciones encuentran variaciones de hasta 7%. Esto, sin duda, influye en el proceso. Se sabe que los efectos producidos por ciertas categorías de óxidos resultan a veces contradictorios: por ejemplo, en el rango de temperaturas usadas en la industria de baldosas, Na₂O y K₂O son fundentes y fomentan una mayor contracción, al contrario de CaO, que suele ser asociado con una expansión, a raíz de una descarbonatación por encima de 650°C (Impiva, 2004). Este efecto, así como cierta propensión a la refractariedad, suelen ser también asociados con la

presencia de MgO, excepto cuando éste se presenta bajo ciertas formas cristalinas distintas de los carbonatos. La presencia de clorita es un ejemplo de excepción. Por otra parte, la combinación de diversos óxidos puede llegar a crear sinergias en cuanto a su impacto sobre los parámetros de proceso. Por ejemplo, la comparación de mapas composicionales de SiO₂ y Al₂O₃ (Figura 5) muestra una posible complementariedad (%Al₂O₃ sube donde %SiO₂ baja), lo cual podría reflejar diferencias importantes de propiedades tales como su refractariedad, o tener incidencia en su granulometría.

Por otra parte, se observa que las zonas relativamente más pobres en Na₂O se ven compensadas por mayores cantidades de K₂O, por lo que la suma Na₂O+K₂O se mantiene relativamente estable. Un fenómeno similar es observado para CaO+MgO, aunque las variaciones globales son significantes.

En cambio, el óxido de hierro (FeO/Fe₂O₃), considerado como fundente y colorante, es más abundante en una zona particular de la mina, lo que hace anticipar diferencias relevantes en la sinterización y el color de quema (Tabla 4, Figura 6). Si esta arcilla fuese candidata para fabricar productos de alfarería industrial en obra limpia (paneles, trincotes), la variación en el color de los productos finales

sería directamente visible por el cliente. En el caso de las baldosas esmaltadas, es recomendable que el espesor de engobe destinado a esconder el color del sustrato y evitar

alteraciones del aspecto visual (“matiz”) del esmalte, sea dimensionado en función de la zona de mayor coloración.

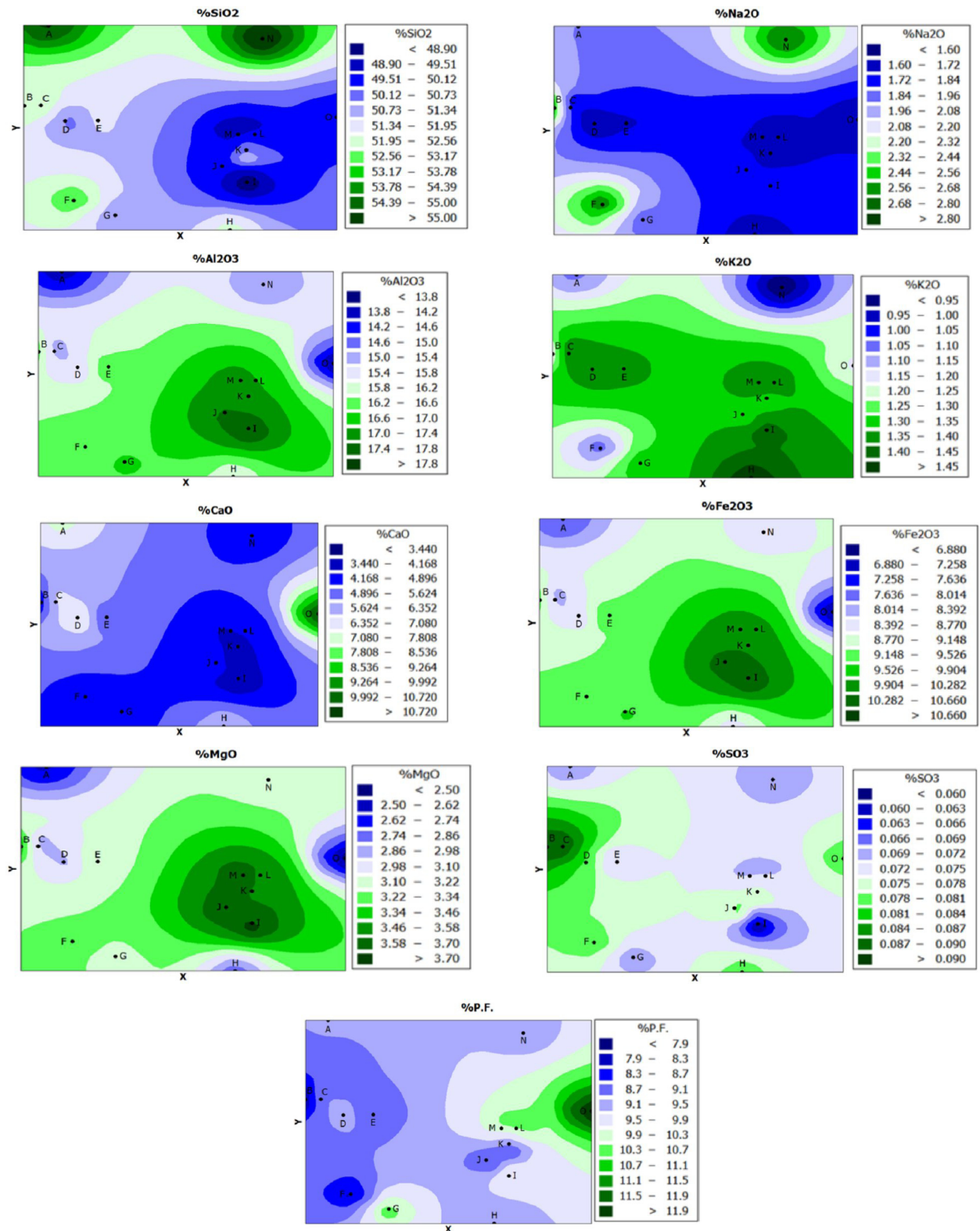


Figura 5. Mapas composicionales y de pérdida al fuego (P.F) de la mina estudiada

Tabla 4. Color de las muestras quemadas a 1100°C

Muestra (matiz 5YR)	Luminancia Munsell	Saturación Munsell
A	5	4
B	4	3
C	5	5
D	4	5
E	4	6
F	4	6
G	4	4
H	4	5
I	3	4
J	4	3,5
K	5	3
L	3	4
M	3	4
N	4,5	5
O	5,5	4

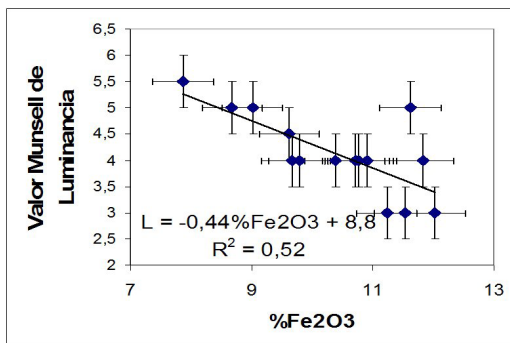


Figura 6. Color de las probetas medido con la tabla de Munsell y correlación con %Fe₂O₃

Las variaciones granulométricas medidas auguran efectos muy notables en todo el proceso, por su papel en la fluidez, permeabilidad y plasticidad. En efecto, la proporción arcillosa cambia del simple al doble según la zona, así como la proporción de material arenoso (considerando la fracción superior a 20 μm). Una comparación de las curvas de defloculación confirma esta predicción en cuanto a la primera propiedad (Figura 7). El mapa de viscosidad mínima obtenida, destaca que se alcanzan viscosidades elevadas en las zonas de mayor porcentaje de finas, con la excepción de la zona E. Esta excepción no es explicada

por la concentración medida de sulfatos (Figura 5), cuya escasa variabilidad no justifica la disparidad observada. Cabe acotar que para especies minoritarias, existe un límite de resolución de la técnica de medición (fluorescencia de rayos X); por lo tanto, habría que recurrir a un método alternativo de medición, como el ensayo Baroid, para confirmar los niveles de azufre (un nivel mayor a 600 ppm puede ser considerado como muy elevado) y discriminar la fracción de sulfatos solubles. Por otra parte, es previsible que el módulo de rotura en crudo y en seco de las baldosas sea mayor en las zonas de mayor fracción fina, lo cual se asocia con menores pérdidas por esquinas rotas y rotura en la línea de decoración (Orta, 2003).

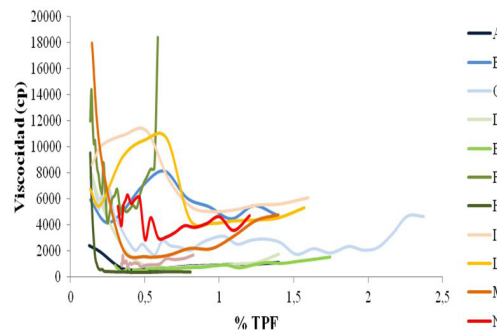
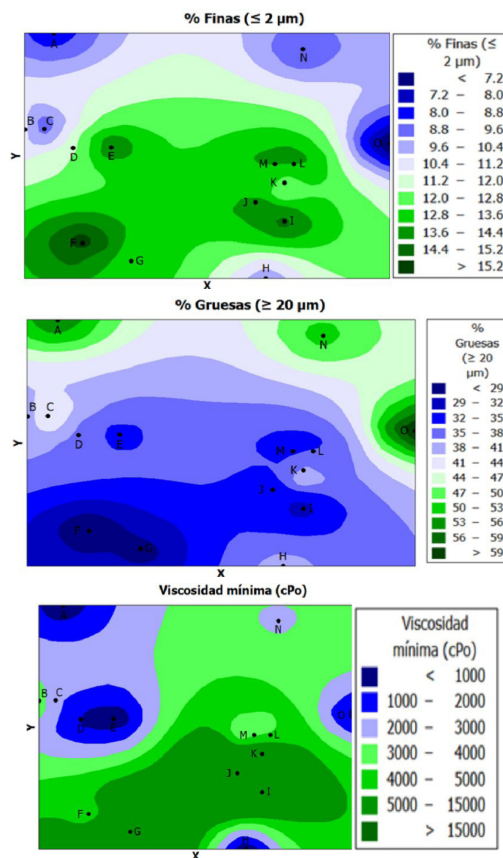


Figura 7. Mapas granulométricos y efecto en las curvas de defloculación con tripolifosfato de sodio (TPF) junto al mapa de viscosidad mínima obtenida. Las muestras G, J y K permanecen por encima de los 8000 cPo

En las zonas de mayor porcentaje de gruesas (y menos finas), se puede anticipar el efecto complementario de mayor permeabilidad, con un secado más productivo en el secadero y en el atomizador: será necesario un menor aporte calórico para no afectar en exceso la humedad y la subsecuente compactación de los gránulos en la prensa.

Asimismo, se observa (Figura 8) que la posición en la mina tiene un papel determinante en el comportamiento en

sinterización: un uso indiscriminado de la arcilla de esta mina tiene un efecto insoslayable en la baldosa final, que puede pasar, en cuanto a absorción de agua, de la categoría BIb a la categoría BIII según el caso, y presentar cambios dimensionales desde una contracción de 8,2% hasta una dilatación de 0,6%. Se puede considerar estos valores de variación como sumamente elevados, si se comparan con los registrados a la entrada de una planta, para otras minas del país, en la Tabla 5.

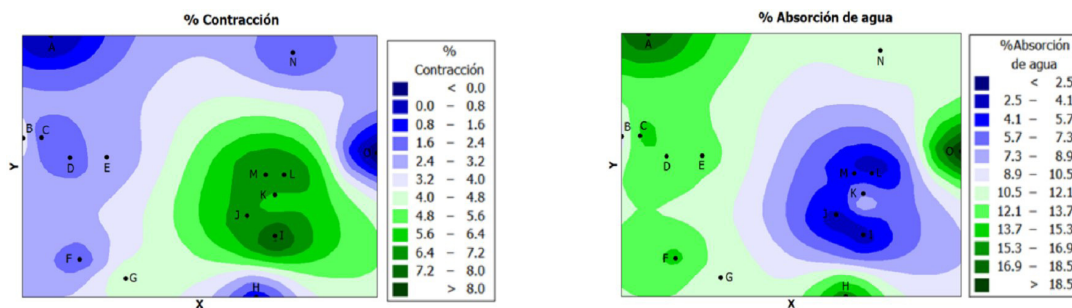


Figura 8. Mapas de contracción de quema y absorción de agua al sinterizar a 1100 °C

Tabla 5. Variación (desviación estándar) de comportamiento en quema de la mina estudiada comparada con otras minas nacionales de arcilla suministradas diariamente a plantas venezolanas de baldosas

Mina	Desviación estándar (%) Absorción de agua	Desviación estándar (%) Contracción de quema
Kr	0,8	0,3
Lb	2,4	1,5
Vr	2,1	1,5
Cl	1,0	0,6
VI	1,2	0,9
Cr	0,9	0,7
Mina estudiada	5,4	3,0

También cabe acotar que todos los valores de dispersión de esta tabla superan con creces los límites impuestos por la norma COVENIN (Tabla 1). En este sentido, la necesidad de compensar la variabilidad de la materia prima no sería un hecho particular a la mina estudiada en el presente estudio, sino una regla general.

Un ajuste parece factible al discriminar (Figura 9) unos clusters de comportamiento en quema: el primero, de fácil sinterización con alta contracción y poca absorción de agua, y el segundo donde el comportamiento opuesto es observado. La opción de mezclar arcillas de ambos clusters y la buena correlación existente entre contracción

y absorción, abren la perspectiva de una compensación de ambas propiedades: es viable, pues, la regularización del aspecto y tamaño final de las piezas. El cluster 1, también puede ser distinguido en los mapas de óxidos de Si, Al, Ca, Mg, y Fe.

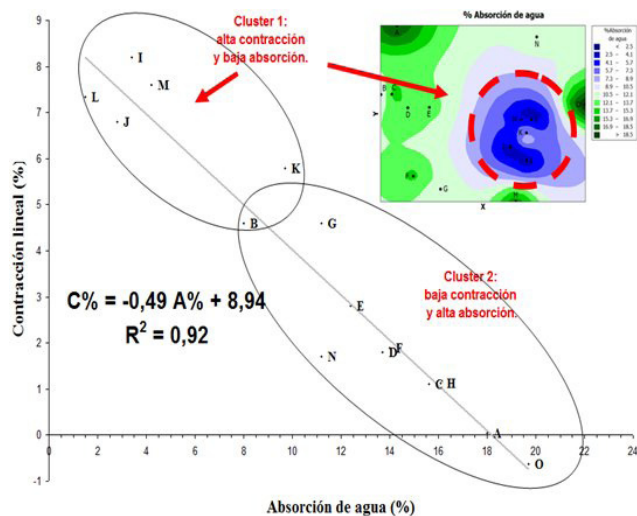


Figura 9. Correlación entre contracción de sinterización y absorción de agua, y discriminación en la mina de clusters de comportamiento en quema

El conocimiento de la composición y de las propiedades resultantes permite predecir, mediante correlaciones, el comportamiento de la materia prima en el proceso. Además del efecto esperado de la proporción de óxidos fundentes, especialmente del óxido de hierro (Figura 10), se observa una buena correlación (Figura 11) de la contracción de

quema con Al_2O_3/SiO_2 y con la fracción superior a $20\ \mu m$ (gruesas: Tabla 6). Ello confirma que la mayor presencia de cuarzo, desgrasante y relativamente inerte a temperaturas del orden de $1100^\circ C$, reduce la contracción de sinterización. El estudio de correlación entre composición y fracción gruesa sugiere (Tabla 6) que los desgrasantes presentes son más pobres en óxidos fundentes (Na, K, Fe) y alúmina. Aunque no se vislumbra una correlación confiable, las Figuras 3 y 7 muestran que las zonas con más gruesas son más ricas en SiO_2 y en caliza (más CaO y pérdida al fuego).

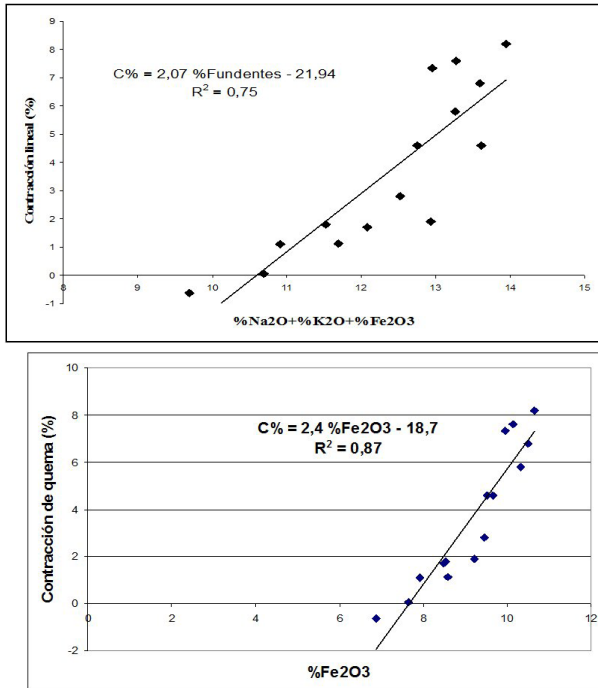


Figura 10. Correlaciones de la contracción lineal de sinterización con la composición de la arcilla empleada

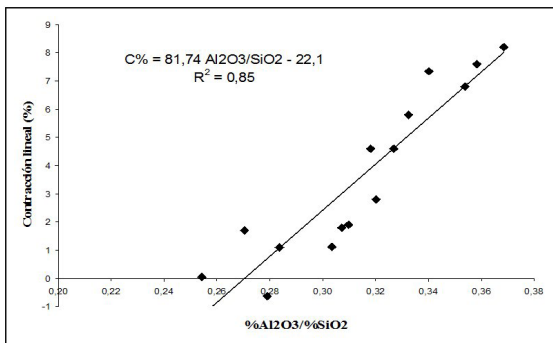


Figura 11. Relación entre contracción lineal y ratio Al_2O_3/SiO_2

Cabe acotar que si bien es corriente observar una menor sinterización en los lotes con mayor cantidad de gruesas, se obtiene una correlación mediocre (Figura 12) entre contracción de quema y residuo a $20\ \mu m$ y $44\ \mu m$, por lo que se descarta anticipar con precisión el comportamiento en

quema de la arcilla a partir de su análisis granulométrico. En este sentido, el análisis químico sigue siendo una herramienta irremplazable.

Tabla 6. Estudio de correlación entre composición y fracción gruesa ($>20\ \mu m$) de la arcilla en la mina estudiada

Óxido usado como variable	Ecuación de la tendencia (y=fracción gruesa, x=%óxido)	Coefficiente (R^2) de correlación
SiO_2	$y = 1,89x - 57,8$	0,17
Al_2O_3	$y = -6,81x + 148,9$	0,63
Al_2O_3 / SiO_2	$y = -236,8x + 113,7$	0,60
Fe_2O_3	$y = -7,11x + 104,2$	0,62
$Na_2O + K_2O + Fe_2O_3$	$y = -6,55x + 120,0$	0,63
$CaO + MgO$	$y = 4,216x + 2,831$	0,46

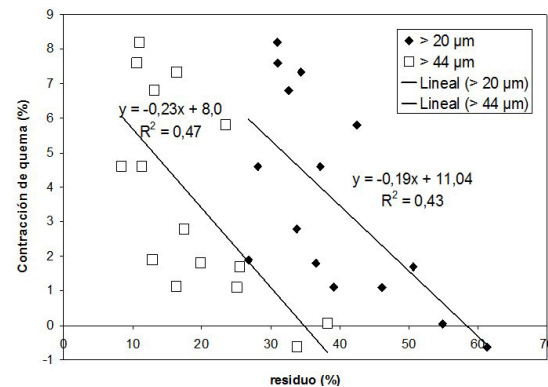


Figura 12. Correlación entre contracción de quema y residuo a $20\ \mu m$ y $44\ \mu m$

CONCLUSIONES

El presente trabajo resalta una realidad teóricamente conocida, pero poco llevada a la práctica industrial: la caracterización integral de las minas es un requisito indispensable para cualquier planta cerámica. La materia prima tiene efectos directos sobre los parámetros del proceso y sobre las características del producto final, dando lugar a variaciones muy por encima del límite normativo, bloqueando el proceso productivo y obligando los operadores a emplear medidas correctivas de emergencia si no se anticipan correctamente estas variaciones. La posibilidad de identificar, en la misma mina, unas zonas ("clusters") de composición granulométrica y propiedades similares en producción, y la factibilidad de combinar lotes de materia prima a partir de las leyes de mezclas (validadas mediante el método de correlación practicado en el presente estudio), representan una opción económica y eficiente para

contribuir a resolver un problema perenne en la industria venezolana. Queda de parte de las gerencias involucradas, el convertir esta opción en una herramienta de uso corriente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a los operadores, supervisores, técnicos e ingenieros de las empresas de baldosas venezolanas contactadas, por su colaboración y su feedback, así como a los Profesores Francis Cordero, del Dpto. Ciencias de la Tierra, y Fernando Torre, del Dpto. Procesos y Sistemas de la Universidad Simón Bolívar.

REFERENCIAS

- ASTM C326-03 (2003). Standard test method for drying and firing shrinkages of ceramic whiteware clays, American Society for Testing Materials.
- ASTM C373-88 (2006). Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products, American Society for Testing Materials.
- CARBONELL, V. (2010). Implementación de un laboratorio de análisis y estudio físico químico de materia prima, Coordinación de Ingeniería de Materiales, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- COVENIN 1466 (2003). Baldosas cerámicas: clasificación y requisitos, Fondonorma.
- ENGFORS, M. (2011). Commercial mobile platforms in an industrial environment, Tesis de MSc, Universidad de Lund, Suecia.
- FUNK, J.E. & DINGER, D.R. (1994). Predictive process control of crowded particle suspensions applied to ceramic manufacturing, Kluwer Academic, 1-19.
- FUNK, J.E., DINGER, D.R., MONTOYA, J.A. (1997). Achieving constant body performance by improving the raw material batch, *Ceramic Industry*, 147, n°7, pp 16-18.
- FAN, R. (2008). Wireless mobile services for industrial applications, The Third e-Services Symposium in The Eastern Province of Saudi Arabia. "The Future of eServices: The Next Step?", Khobar, Arabia Saudita, Feb. 2008, 24-30.
- HACKLEY, P. C., URBANI, F., KARLSEN, A.W., GARRITY CH., P. (2006). Mapa Geológico de Venezuela, Hojas 1 y 2.
- IMPIVA, (2004). Tecnología cerámica aplicada, Volumen II, Faenza Editrice Ibérica, S.L., Castellón, 214, 300.
- LABORIE, F., CHATTY, S., REYTEROU, C. (2005). Coordination and Collaboration Environments for Production Lines: A User Acceptance Issue, ECSCW 2005: Proceedings of the Ninth European Conference on Computer-Supported Cooperative Work, 18-22 September 2005, Paris, France, pp. 407-426., (Ed) H. Gellersen *et al.*, Pub Springer.
- LIKER, J. (2006). Las claves del éxito de Toyota. Ed. Gestión 2000, Barcelona, pp. 195-196.
- ORTA, M.C. (2003). Integración Geológica de la región Caracas-Charallave-Santa Teresa del Tuy Distrito Capital. Tesis de la Universidad Central de Venezuela (Escuela de geología), Caracas, Venezuela.
- PESANTES, J. (2000). Incorporación de materias primas plásticas nacionales en formula de pasta sanitaria, Coordinación de Ingeniería de Materiales, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela
- PICARD, X. & PIMENTEL, N. (1968). Geología de la cuenca de Santa Lucia-Ocumare del Tuy. *Bol. Geol.*, 10(19): 263-296.
- POIRIER, T., LAVELLE, C., GONZALEZ, M.C., TONITO, Y., KONNDRYN, J., VILORIA, M., ROZ, M. (2002). Optimización de la preparación de barbotina en plantas de baldosas, *Cerámica información* 290, pp. 73-78.
- POIRIER, T. (2005) Estudio de aditividad de color, plasticidad y contracción de secado en mezclas arcillosas crudas, *Cerámica Información*, vol. 317, pp 69-74
- SMITH, R. J (1952). Geología de la región de Los Teques-Cúa, *Bol. Geol. (Venezuela)*, 2(6): 333-406.
- VARGAS, E. (2002). Comportamiento en plasticidad y al secado de mezclas arcillosas nacionales, Coordinación de Ingeniería de Materiales, Universidad Simón Bolívar; Sartenejas, Venezuela.