

LAS ZEOLITAS NATURALES DE CUBA

INTRODUCCIÓN

JORGE LUIS COSTAFREDA MUSTELIER

Fundación Gómez Pardo

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía

Universidad Politécnica de Madrid

España

DOMINGO ALFONSO MARTÍN SÁNCHEZ

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía

Universidad Politécnica de Madrid

España

MERCEDES BELEN ROSELL LAM

Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales de Construcción

La Habana, Cuba

JORGE LUIS COSTAFREDA VELÁZQUEZ

Universidad de Holguín

Cuba

Las características geológicas de Cuba hacen de este archipiélago un enclave favorable para el desarrollo de yacimientos de zeolitas naturales, y la prueba de esto puede encontrarse en los hallazgos realizados en casi toda la extensión de la superficie física del territorio, con excepción de unas pocas regiones. Por lo general, los yacimientos están relacionados espacialmente con las formaciones y estructuras geológicas del arco de islas, específicamente con las cuencas de retroarco que se formaron durante el Cretácico, el Paleoceno y el Eoceno (Coutín, D. y Brito, A., 1975).

Los investigadores cubanos coinciden en que la formación de estos yacimientos obedece a un proceso mediante el cual la alteración del vidrio, contenido en las tobas de composición media y ácida, originó fases mineralógicas bien definidas, en las cuales una de ellas formó la paragénesis clinoptilolita-heulandita-mordenita, mientras que en la otra se formaron las esmectitas, cuyo principal mineral es la montmorillonita.

En las cuencas de retroarco, así como en las formaciones vinculadas a la fase final del arco de islas, en Cuba central (zona axial), fueron favorables las condiciones geológicas y geoquímicas para la alteración masiva del vidrio volcánico. Los yacimientos más productivos se ubican en las partes superiores de los ciclos de sedimentación, asociados a las tobas vitroclásticas.

Sin embargo, el descubrimiento de las tobas zeolitizadas en Cuba es un evento relativamente reciente. Fue en la década de los años setenta cuando se estableció el carácter industrial del primer yacimiento de zeolitas, que precedió las importantes publicaciones de los geólogos del Instituto de Geología y Paleontología (Coutín, D. y Brito, A., 1975), donde se revelaron por primera vez los resultados de sus investigaciones, quedando demostrada la existencia de varios miembros de la familia de las zeolitas, a saber: clinoptilolita, mordenita, heulandita, analcima, estilbita, thomsonita y laumontita.

Durante los años ochenta proliferaron las investigaciones relacionadas con este mineral, profundizándose no sólo en su caracterización, sino también en su normalización y posibilidades tecnológicas al más alto nivel, con la consecuente aplicación en sectores específicos de la economía cubana.

Brito, A. y Coutín, D. (2017) ofrecen en su reciente monografía titulada “Las zeolitas de Cuba: recuento de 45 años dedicados a su estudio” una amplia documentación sobre los resultados obtenidos en sus diversas investigaciones previas sobre la mineralo-

gía, la composición química y el comportamiento tecnológico de estos minerales, que han servido de punto de partida para su amplia aplicación en la actualidad (tablas 9 y 10). Su trabajo contempla también un nuevo modelo genético de los yacimientos de zeolitas de la República de Cuba.

Tabla 9. Composición mineralógica de algunas especies de zeolitas comunes en los yacimientos de la República de Cuba (Brito, A. y Coutín, D., 2017).

TABLA 9. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE ALGUNAS ESPECIES DE ZEOLITAS COMUNES EN LOS YACIMIENTOS DE LA REPÚBLICA DE CUBA				
Parámetros más importantes	CLINOPTILOLITA	HEULANDITA	MODERNITA	ANALOMA
Singonia	Monoclínica	Monoclínica	Rómbica	Cúbica
Forma de los cristales	Láminas tabulares	Tablillas	Fibras, varillas, varras	Isométrica indeterminada
Celda Elemental	a=17,62 Å; b=15,62 Å; c=7,36 Å; β= 91° 30'	No hay datos de los autores	a=17,89 Å; b=20,20 Å; c=7,44 Å	No hay datos de los autores
Reflejos difractométricos característicos (Å)	9,0; 7,94; 3,96; 2,97; 2,79	8,89; 3,95; 2,97	13,5; 9,1; 3,97; 3,48; 3,38; 3,22	5,60; 3,42; 2,92
Fórmula estructural	$(Ca_{1,43} Mg_{0,91})_{2,34} (K_{1,92} Na_{0,41})_{2,06} Si_{29,33} Al_{5,77} Fe^{+3}_{0,90} O_{72} + 10H_2O$	$(Ca_{3,55} Mg_{0,5} Sr_{0,1} Ba_{0,4}) Na_{0,36} K_{0,44} Si_{26,06} Al_{8,40} O_{72} + 24 H_2O$	$(Ca_{1,04} Mg_{0,57} Fe^{+2}_{0,08})_{1,69} (K_{0,81} Na_{0,73})_{1,54} [Si_{31,05} Al_{4,58} Fe^{+3}_{0,36}]_{36} O_{72} + 16,32 H_2O$	No hay datos de los autores
Efectos térmicos (°C)	Pico endotérmico: 130-260	Picos endotérmicos: 240 (ancho), 360 y 760	Pico endotérmico: 130-260	Picos endotérmicos: 300-350 y 560
Bandas de absorción (cm ⁻¹)	1012 y 610	No hay datos de los autores	1020 y 630	No hay datos de los autores
Índice de refracción	1,479 - 1,480	1,500 - 1,502	1,482 - 1,485	1,486 (promedio)
Peso específico, (g/cm ³)	2,13 - 2,16	2,14	2,10 - 2,12	2,52 - 2,61

Vale destacar el papel que cumplieron las zeolitas cubanas en el llamado “Período especial revolucionario”, durante el cual fueron empleadas de forma intensiva como sustratos en los zeopónicos, iconos de la agricultura urbana de entonces, que en tan dramáticos momentos favoreció enormemente el abastecimiento de verduras y hortalizas a la población cubana.

Tabla 10. Composición química de algunas especies de zeolitas comunes en los yacimientos de la república de Cuba (Brito, A. y Coutín, D., 2017).

TABLA 10. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGUNAS ESPECIES DE ZEOLITAS COMUNES EN LOS YACIMIENTOS DE LA REPÚBLICA DE CUBA										
Depósitos	Castilla - Lapita	Piojillo - Tasajera	Siguaney	Carolina	El Chorrillo	Las Margaritas	Gualcanimar	San Andrés	Palmarillo de Cauto	
Zeolita predominante	Clinop	Clinop	Mord	Clinop	Clinop-Mord	Analc	Heul	Clinop	Mord	
Clinop=Clinoptilolita; Mord=Mordenita; Analc=Analcima; Heul=Heulandita										
Parámetros										
Óxidos (% en peso)	SiO ₂	56,99	63,03	62,02	59,92	60,78	63,41	52,36	64,94	61,12
	Al ₂ O ₃	13,30	12,62	12,96	11,65	12,36	12,12	14,53	10,95	11,30
	Fe ₂ O ₃	3,66	1,85	1,97	3,92	3,69	2,53	4,53	1,19	3,20
	FeO	1,79	1,03	1,03	0,94		0,54	0,13	0,79	1,60
	MgO	2,31	0,64	1,75	1,44	1,45	1,32	1,70	1,08	1,90
	CaO	5,02	3,58	3,59	6,59	5,63	4,63	6,71	3,04	4,01
	Na ₂ O	2,15	0,87	2,36	0,97	1,79	4,38	0,66	2,54	2,20
	K ₂ O	1,51	1,23	0,84	1,27	0,51	1,01	1,35	1,29	1,30
	H ₂ O	12,73	14,55	13,06	12,37	12,21	5,67	8,46	14,04	12,88
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)	Total	116,21	135,16		114,32	97,14			138,48	129,55
	Ca	53,14	53,27		65,01	43,74			39,22	57,82
	Mg	3,89	2,07		6,29	2,84			4,56	2,10
	Na	31,98	48,31		32,83	34,45			53,81	50,18
	K	2,63	4,63		8,62	1,81			6,36	2,44
Calor de inmersión (°C)	Δt	10,3	12,2		11,9	9,7	4,3		10,9	12,8
Actividad puzolánica (mg de CaO absorbidos)			156	168	160	90	75		150	126

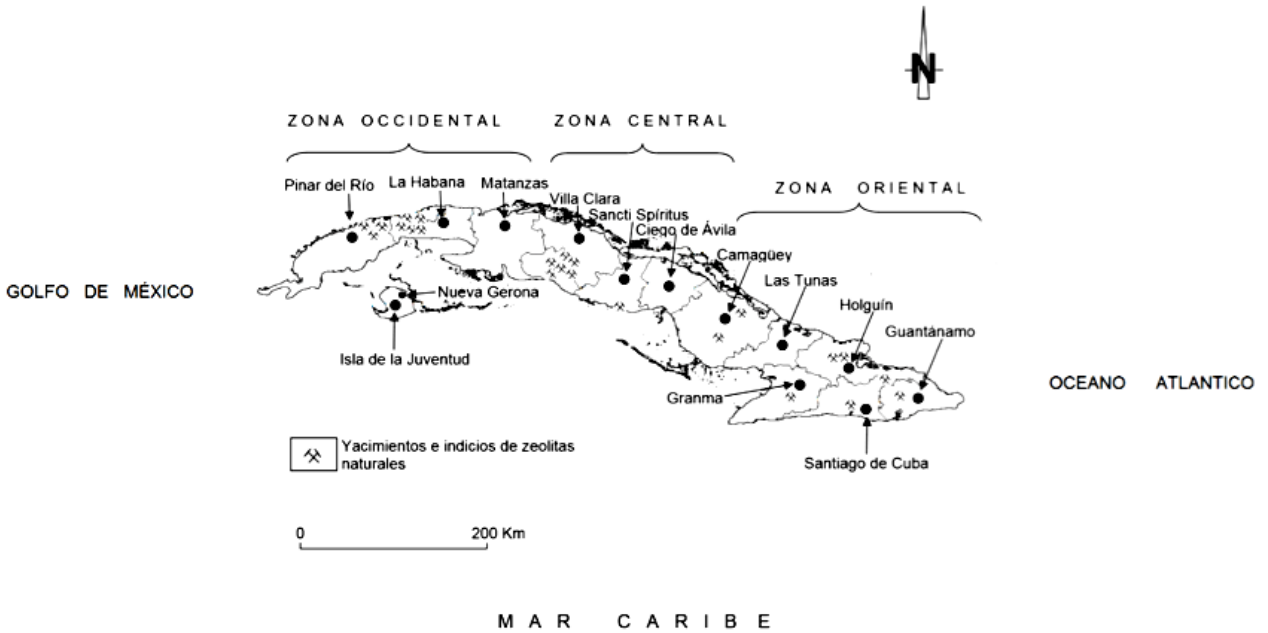
CONTEXTO GEOLÓGICO DE LOS YACIMIENTOS DE ZEOLITAS NATURALES DE CUBA

Como ya se ha comentado, la inmensa mayoría de los investigadores cubanos mencionan yacimientos e indicios de zeolitas en prácticamente todo el archipiélago (figura 25), vinculados a las formaciones volcánicas típicas del Cretácico y del Paleoceno-Eoceno, donde el desarrollo del arco de islas cubano tuvo su plena formación. De este modo, los estudios realizados por Iturralde-Vinent, M. (1996) y Orozco, G. y Rizo, R. (1998), permiten describir el contexto geológico de las zeolitas por regiones, como se hace en los párrafos que siguen.

YACIMIENTOS DE LA ZONA OCCIDENTAL

Las rocas zeolitizadas de la zona occidental de Cuba se relacionan con las secuencias volcánosedimentarias de la cuenca de retroarco, que afloran como una estrecha franja desde *Bahía Honda* hasta *Matanzas* (figura 25).

Figura 25. Ubicación de los principales yacimientos de zeolitas naturales por regiones (Orozco, G. y Rizo, R., 1998; Costafreda, J.L., 2012).



En el extremo occidental, en la provincia de *Pinar del Río*, los yacimientos de zeolitas están localizados en las regiones de *Bahía Honda* y *El Mariel*, insertos en la *Formación Orozco*, cuya edad se ha determinado como Cretácico Superior (Cenomaniense-Campaniense) (tabla 11).

Tabla 11. Localización de los principales yacimientos de tobas zeolitizadas por zonas y regiones (Modificado de Orozco, G. y Rizo, R.,1998).

Los principales litotipos estudiados en esta formación están representados por tobas ácidas dacíticas, de granos finos a gruesos, y tufitas; aunque se han estudiado facies de tobas más básicas, de composición basáltica, que llegan a alcanzar en su conjunto los trescientos metros de potencia, y presentan contenidos anómalos de clinoptilolita. Yacimientos como *La Mulata*, *Blanca Arena* y *Orozco* (tabla 11) son, por mencionar algunos ejemplos, los más conocidos en esta región.

TABLA 11. LOCALIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS DE TOBAS ZEOLITIZADAS POR ZONAS Y REGIONES

Zona occidental	Zona central (Villa Clara)	Zona oriental
La Mulata (<i>Bahía Honda</i>)	<i>Piojillo</i>	San José del Chorrillo (<i>Camagüey</i>)
Blanca Arena (<i>Bahía Honda</i>)	<i>Tasajeras</i>	San Cayetano (<i>Camagüey</i>)
Orozco (<i>Bahía Honda</i>)	<i>Chucho Rojas</i>	San Andrés (<i>Holguín</i>)
La Victoria (<i>El Mariel</i>)	<i>La Conductora</i>	Sagua de Tánamo (<i>Holguín</i>)
San Ignacio (<i>El Mariel</i>)	<i>La Joaquina</i>	Bueycito (<i>Granma</i>)
Peñas Altas (<i>El Mariel</i>)	<i>Carolina</i>	Palmarito de Cauto (<i>Santiago de Cuba</i>)
Tumba Cuatro (<i>El Mariel</i>)	<i>Siguaney</i>	Palenque de Yateras (<i>Guantánamo</i>)
Castilla (<i>El Mariel</i>)		Caimanes (<i>Sagua de Tánamo, Holguín</i>)

Tabla 12. Composición química obtenida del estudio de muestras de zeolitas procedentes de algunos yacimientos de la provincia de Pinar del Río (Coutín, D. y Brito, A., 1975).

En la antigua provincia Habana, actualmente dividida en Artemisa y La Habana, colindante con Pinar del Río, se ha establecido la existencia de

yacimientos de zeolitas, específicamente en las localidades de *Campo Florido* y *Canasí*, vinculadas con las formaciones *Chirino*, *La Trampa* y *Orozco* (Iturralde-Vinent, M. *et al.* 1996) (tabla 11). Los análisis de fases han demostrado la gran pureza de la clinoptilolita y la mordenita detectadas en los yacimientos e indicios de *La Victoria*, *San Ignacio*, *Peñas Altas*, *Tumba Cuatro* y *Castilla* (Coutín, D., Brito, A., 1975) (tablas 11 y 12).

TABLA 12. COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDA DEL ESTUDIO DE MUESTRAS DE ZEOLITAS PROCEDENTES DE ALGUNOS YACIMIENTOS DE LA PROVINCIA DE PINAR DEL RÍO

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	H ₂ O ⁻	H ₂ O ⁺	P.P.C.	Total
Peñas Altas (Clinoptilolita)	65,96	11,44	1,08	0,07	3,23	0,30	1,00	1,35	0,33	6,35	9,44	-	100,55
La Victoria (Clinoptilolita)	62,83	13,18	0,51	0,06	3,83	0,57	0,61	1,47	0,34	6,35	10,73	-	100,55
La Mulata (Mordenita)	66,80	13,21	1,95	0,25	2,04	7,01	0,87	0,40	0,62	-	-	7,60	100,80
Blanca arena (Clinoptilolita)	63,63	13,21	2,04	0,86	3,34	1,37	1,32	1,73	0,41	-	-	11,58	99,99
Orozco (Clinoptilolita)	66,65	11,42	4,09	0,39	2,98	1,55	2,51	0,80	0,48	-	-	8,46	99,83

LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE CUBA HACEN DE ESTE ARCHIPIÉLAGO UN ENCLAVE FAVORABLE PARA EL DESARROLLO DE YACIMIENTOS DE ZEOLITAS NATURALES, Y LA PRUEBA DE ESTO PUEDE ENCONTRARSE EN LOS HALLAZGOS REALIZADOS EN CASI TODA LA EXTENSIÓN DE LA SUPERFICIE FÍSICA DEL TERRITORIO, CON EXCEPCIÓN DE UNAS POCAS REGIONES.

YACIMIENTOS DE LA ZONA CENTRAL

Los principales yacimientos e indicios de zeolitas de la zona central de Cuba se ubican en una extensa franja que supera los veinte kilómetros de longitud, con ancho de hasta cinco kilómetros, a poca distancia de Santa Clara, la capital provincial. Los yacimientos más estudiados y con categoría industrial son los conocidos como *Piojillo* y *Tasajeras*; siendo este último uno de los mayores de Cuba. Los restantes indicios son *Chucho Rojas*, *La Conductora*, *La Joaquina* y algunas manifestaciones detectadas en las cercanías de Cienfuegos, que completan el catálogo de yacimientos de esta región (tabla 11).

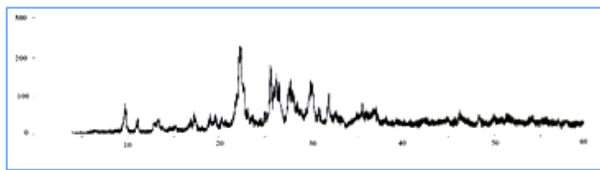


Figura 26. Diffractograma de una toba zeolitizada rica en clinoptilolita procedente del yacimiento Tasajeras, en Villa Clara (Costafreda, J.L., 2008).

Piojillo y *Tasajeras*, ubicados a once kilómetros aproximadamente al suroeste de la ciudad de Santa Clara, y a tres kilómetros al noreste de la localidad *San Juan de los Yeros*, son los primeros yacimientos estudiados en Cuba (figuras 25 y 26).

La mineralización zeolítica se vincula directamente a la *Formación Hilarío*, constituida por tobas vitrocrystaloclásticas de color blanco verdoso, ligeras y/o compactas (Coutín, D., Brito, A., 1975) de edad Cretácico Superior (Campaniense). Estas

tobas se encuentran alteradas a zeolitas, y presentan interestratificaciones de aleurolitas tobáceas y tufitas (García, M., 1988).

Las tobas zeolitizadas tienen contenidos entre el 50 y el 90 por ciento de clinoptilolita, que constituye la fase principal, y mordenita (tabla 13).

El yacimiento de tobas zeolitizadas de *Siguaney* se encuentra en la provincia de Sancti Spiritus, a 2,5 kilómetros al norte-noroeste del poblado de Siguaney (González, I., 1987) (tabla 11). Estas litologías pertenecen a la *Formación Bijabo*, de edad Eoceno Inferior-Medio, y están compuestas por areniscas, gravelitas, calcarenitas, margas, conglomerados, calizas fragmentarias y arcillas derivadas del flysch. Las tobas zeolitizadas son de color verde claro a blanco verdoso y de grano fino, y ocupan la parte inferior de la secuencia. Generalmente, tienen texturas vitroclásticas y en ellas se han detectado clinoptilolita, mordenita y analcima.

Las tobas zeolitizadas del yacimiento *Siguaney* se han empleado en la producción de cementos, motivado por sus excelentes propiedades puzolánicas.

Por último, se menciona el yacimiento *Carolina*, cuyo enclave se localiza a siete kilómetros de la ciudad de *Cienfuegos* (tabla 11). La mineralización zeolítica está asociada a formaciones de tobas vitrocrystaloclásticas de composición media, que pertenecen a la unidad geológica del Maestrichtiense, conocida como Miembro *Carolina*. Las principales variedades de zeolitas son clinoptilolita y mordenita, y sus contenidos alcanzan el 60 por ciento (Pérez, O., 1991).

TABLA 13. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE MUESTRAS DE TOBAS ZEOLITIZADAS DE ALGUNOS YACIMIENTOS DE LA ZONA CENTRAL DE CUBA

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Total
El Piojillo	65,11	10,73	1,87	3,58	0,94	1,49	0,95	0,22	99,50
Chucho Rojas	65,83	11,00	1,16	4,14	0,79	1,06	1,06	0,25	99,63
Conductora	64,82	11,50	1,19	3,40	1,02	0,58	0,58	0,35	99,66
Tasajeras)	66,55	11,75	1,430	2,824	0,947	1,677	1,376	0,278	99,98

Tabla 13. Composición química de muestras de tobas zeolitizadas de algunos yacimientos de la zona central de Cuba. Análisis por FRX+A. Atómica (Sodio). Instituto Geológico y Minero de España (Coutín, D., Brito, A., 1975), (Costafreda, J.L., 2008).

YACIMIENTOS DE LA ZONA ORIENTAL

Las primeras investigaciones sobre zeolitas en la zona oriental tuvieron lugar en la provincia de Camagüey con el hallazgo de heulandita al sur de la ciudad del mismo nombre, y analcima en las cercanías de Nuevitas, en las formaciones volcano-sedimentarias del Cretácico Superior (Coutín, D., Brito, A., 1975). Las zeolitas, específicamente las descubiertas en Nuevitas, se vinculan con tobas vitroclásticas visiblemente alteradas, en las cuales los cristales no superan los 0,05 milímetros de diámetro; suelen estar acompañados de una fase secundaria compuesta por cuarzo, oligoclasa y arcillas (Coutín, D., Brito, A., 1975), (Iturralde-Vinent, M. *et al.* 1996).

El yacimiento conocido como *San José del Chorri-llo* es el más importante y más meridional de la provincia de Camagüey (Torres, J., 1987) (tabla 11). Las rocas portadoras de la mineralización zeolí-

tica forman parte del Miembro *Vialla*, *Formación Contramaestre*, datada como Cretácico Superior (Santoniense-Campaniense), donde predominan tobas cineríticas, silicíticas, tufitas de grano fino y calizas biomicríticas que se depositaron en medios abisales, lejos de los focos volcánicos, como lo atestiguan las silicíticas con radiolarios y la ausencia de rocas efusivas (Iturralde-Vinent, M. *et al.* 1996). La fase principal está representada por clinoptilolita y mordenita, mientras que la fase secundaria está compuesta por calcita, cuarzo y montmorillonita en las tobas cineríticas.

El yacimiento de zeolitas *San Cayetano* se localiza a unos treinta kilómetros al sur de la ciudad de Camagüey (Álvarez, T., 1990) (tabla 11), y está constituido por litologías de la *Formación Vertientes*, datada con edad Paleógeno (Eoceno Inferior-Eoceno Medio). Desde el punto de vista estratigráfico, la formación se compone de espesores más o menos potentes de areniscas calcáreas que engloban clastos de origen volcánico con tamaño de grano de medio a grueso; de igual modo se encuentran tobas, areniscas calcáreas de grano medio a fino y cemento arcilloso-calcáreo, margas blancas, calizas arenosas, gravelitas y conglomerados polimícticos.

Las tobas zeolitizadas son principalmente vitroclásticas, de color verde claro, predominando en ellas la mordenita y la clinoptilolita, ésta última en menor proporción. El contenido de zeolitas en las rocas varía entre el 50 y el 80 por ciento.

Coutín, D. y Brito, A. (1975) mencionaron la presencia de un yacimiento de tobas zeolitizadas en la localidad de San Andrés, provincia de Holguín (tabla 11), ubicado a diecisiete kilómetros al noroeste de la capital provincial. Según sus informes, estas zeolitas, cuyas fases mineralógicas principales están constituidas por clinoptilolita-mordenita, son de buena calidad, y con contenidos anómalos que varían desde el 85 al 90 por ciento, aportando perspectiva minera a esta región.

Figura 27. Vista parcial de un frente de explotación activo en el yacimiento de zeolitas de *Loma Blanca*, San Andrés, provincia Holguín (Fotografía: Costafreda, J.L.; Martín, D.A. y Costafreda, J.L. (Jr.), 2011).



Los trabajos de Földessy, J. (1988) confirmaron la existencia del yacimiento, y permitieron ampliar las zonas de interés allende los límites iniciales, creándose así los sectores conocidos como *Loma Blanca* y *La Mula* (figura 27).

Posteriormente, Costafreda, J.L. (2008) dio un paso más en las investigaciones del yacimiento Loma Blanca (San Andrés), demostrando que la composición química y mineralógica de las menas (tabla 14 y figura 28) son las causas de sus magníficas propiedades puzolánicas, obteniendo resultados alentadores en la fabricación de cementos, morteros y hormigones.

TABLA 14. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGUNAS MUESTRAS DE ZEOLITA DEL YACIMIENTO LOMA BLANCA, SAN ANDRÉS, PROVINCIA HOLGUÍN, EN LA REGIÓN ORIENTAL DE CUBA

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P.P.C.
San Andrés 1	65,41	13,15	1,9	4,32	0,36	2,23	0,48	12,56
San Andrés 2	65,55	11,75	1,430	2,824	0,947	1,677	1,376	14,15

Tabla 14: Composición química de algunas muestras de zeolita del yacimiento *Loma Blanca*, San Andrés, provincia Holguín, en la región oriental de Cuba (análisis por FRX+A. atómica-sodio) (Costafreda, J.L., 2008).

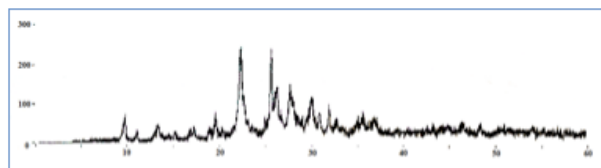


Figura 28. Diffractograma de una toba zeolitizada compuesta por clinoptilolita-mordenita tomada en el yacimiento *Loma Blanca*, San Andrés, provincia Holguín (Costafreda, J.L., 2008).

Actualmente las tobas zeolitizadas se encuentran en plena explotación bajo la dirección de la Unidad Geológica de San Andrés, subsidiaria de la Empresa Geominera de Oriente, que ostenta los derechos de la concesión minera (Figura 29).

Figura 29. Vista panorámica de la planta de procesamiento de zeolitas emplazada en el flanco norte del yacimiento *Loma Blanca*, San Andrés, provincia Holguín. (Fotografía: Costafreda, J.L.; Martín, D.A. y Costafreda, J.L. (Jr.), 2011).



Sin embargo, los afloramientos de rocas zeolitizadas en la región de Holguín son prácticamente ubicuos, ya que se localizan también en *Tacajó*, *Santa Lucía* y *Cabo Lucrecia* (Pentelényi, L. y Garcés, E., 1988).

Todas las manifestaciones importantes de zeolitas estudiadas en la región se vinculan a la *Formación Loma Blanca*, de edad Cretácico Inferior-Superior (Aptiano-Campaniano); mientras que las menos importantes yacen dentro de las formaciones *Haticos* y *Vigía*, datadas como Paleoceno Inferior-Medio (Pentelényi, L. y Garcés, E., 1988).

Las tobas zeolitizadas forman capas de hasta quince metros de espesor, donde alternan con distintos litotipos de tobas (vitroclástica, litoclástica y cristaloclástica). La mineralización zeolítica se enmarca en una posición estratigráfica donde el quimismo suele ser más ácido, con predominio de tobas de tipo riódacítico (Pentelényi, L. y Garcés, E., 1988).

En la región *Mayarí-Baracoa* afloran sobre una gran extensión los materiales de la *Formación Santo Domingo*, la cual está constituida por una secuencia bien estratificada de tobas vitrocrystaloclasticas de composición andesítica y tufitas con radiolarios. Las rocas son de color verde, verde violáceo, gris verdoso y carmelita. Se asume para esta Formación una edad Cretácico Superior (Turoniense) o, incluso, más reciente. Esta secuencia se depositó en una cuenca yuxtapuesta al eje del arco volcánico del Cretácico, probablemente en aguas profundas (Iturralde-Vinent, M. *et al.* 1996).

Con las investigaciones de Freyre, F. (1984) sobre un área ubicada al sur del municipio *Sagua de Tánamo* (tabla 11), quedó establecida la presencia de mineralización zeolítica en forma de clinoptilolita-mordenita vinculada a tufitas y tobas de composición andesítica.

En la región de la *Sierra Maestra*, en la parte sur oriental de Cuba, se menciona el yacimiento de zeolitas *Bueycito* (figura 25 y tabla 11), a pocos kilómetros al sur de la ciudad de Bayamo, capital de la provincia Granma. Las secuencias volcánicas y sedimentarias se incluyen en la *Formación El Cobre*, de edad Paleoceno-Eoceno Medio, que posee una potencia de más de seis mil metros, y en ella se insertan también las formaciones *Pilón* y *Caney*, siendo esta última una estrecha faja que yace al norte de la Sierra Maestra, compuesta por tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas y calizas tobáceas bien estratificadas.

Vale destacar que estos depósitos se vinculan tanto a la *cuenca de retroarco* como a la zona axial del arco paleógeno cubano en su posición original, según los testimonios de Iturralde-Vinent, M. (1996); a estas grandes unidades pertenecen también algunos litotipos estudiados en las provincias de Santiago de Cuba, Guantánamo, Holguín y Granma, propiamente dicho. La repetición de los rasgos geológicos que define la indiscutible relación existente entre la mayoría de los yacimientos de zeolitas y las grandes unidades efusivo-sedimentarias presentes en casi la totalidad del archipiélago cubano, hacen de éste el enclave geológico más importante a la hora de considerar los principales índices directos de prospección de yacimientos de zeolitas.

La Sierra Maestra (figura 30), que representa, junto a otros iconos de Cuba como el Río Cauto (figura 31), el símbolo de la guerra que libró a los cubanos en 1959 de las vicisitudes impuestas por el régimen imperialista de Fulgencio Batista, es el escenario geológico donde se verificó el mayor desarrollo del arco volcánico en el Paleógeno, y constituye su *zona axial*. Este macizo forma una cadena orogénica bien definida, con dirección este-oeste, extendiéndose a lo largo de doscientos cincuenta kilómetros, aproximadamente, desde la bahía de Guantánamo, al este, hasta Cabo Cruz, al oeste.

Figura 30. Vista del poblado *El Cobre*, en primer plano, que representa la *Localidad Tipo* que aporta la toponimia a la formación del mismo nombre. Véase a continuación, en la parte central, las escombreras generadas por la extracción de menas cupríferas. Al fondo puede apreciarse parte de las estribaciones más meridionales de la Sierra Maestra (Fotografía: Costafreda, J.L. (Jr.), 2011).



Figura 31. Vista parcial del *Río Cauto* a su paso por el poblado de *Palmarito de Cauto*, en la provincia de Santiago de Cuba. Nótese los espesores de los afloramientos que flanquean la ribera norte del río, constituidos por tobas fuertemente alteradas por los procesos de zeolitización con concentración anómala de mordenita, superior al 70 por ciento (Fotografía: Costafreda, J.L.; Martín, D.A. y Costafreda, J.L. (Jr.), 2011).



CUBA ES SIN LUGAR A DUDAS UNO DE LOS PAÍSES PIONEROS EN ASIGNAR EL MAYOR NÚMERO DE APLICACIONES A SUS RESERVAS DE ZEOLITAS NATURALES, Y ESTA INICIATIVA ES CONSECUENCIA DE UNA NECESIDAD QUE TIENE SU ORIGEN EN EL BLOQUEO ECONÓMICO IMPUESTO POR ESTADOS UNIDOS DESDE LOS COMIENZOS DE LA DÉCADA DE LOS SESENTA. EL GRAN ABANICO DE USOS SE HA VISTO BENEFICIADO, AL MISMO TIEMPO, POR LA INNEGABLE CALIDAD DE ESTOS RECURSOS.

En esta zona descuellan algunos rasgos orogénicos importantes, como el *Pico Turquino*, que se eleva hasta unos mil novecientos setenta y cuatro metros sobre el nivel del mar, y constituye el punto de máxima cota de la República de Cuba. La altura media calculada para el enclave orogénico de la Sierra Maestra varía desde los trescientos a los mil quinientos metros, si se tiene en cuenta la altura de los picos *Cuba* y *Suecia*, los cuales se elevan por encima de los mil ochocientos y mil setecientos treinta y cuatro metros, respectivamente, sobre el nivel del mar.

La zeolita estudiada en el yacimiento *Bueycito* (tabla 11) es de tipo mordenita, con una abundancia modal del 50 por ciento, y está vinculada genéticamente con minerales del grupo de las esmectitas, principalmente montmorillonita. Las rocas encajantes de la mineralización consisten en tobas vitroclásticas masivas de composición media, que acusan diferentes grados de zeolitización (Bolívar, G., 1989).

Sin embargo, otras rocas zeolitizadas afloran más hacia el norte y el este, y forman una franja discontinua desde *Palmarito de Cauto* hasta *Palenque de Yateras*, incluidas en las formaciones *Sabaneta*, *El*

Cobre y *Miranda*. Las rocas de caja son tobas vitro-cristalolitoclásticas, entre las cuales se intercalan tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, conglomerados volcanomícticos y cuerpos relictos de basaltos que indican actividades efusivas tardías. Todos estos terrenos están incluidos dentro de la mencionada *Formación Sabaneta*, cuya edad se ha fijado en el Paleoceno Inferior (Daniense) - Eoceno Medio.

El yacimiento *Palmarito de Cauto* (tabla 11 y figura 31) está ubicado en la provincia de Santiago de Cuba, en la localidad que lleva el mismo nombre, y colinda con los municipios Julio Antonio Mella y Palma Soriano. Las variedades mineralógicas de zeolitas estudiadas en este yacimiento consisten en mordenita, que constituye la fase predominante con un contenido que sobrepasa el 70 por ciento, y clinoptilolita, con una abundancia subordinada del 10 por ciento (figura 32 y tabla 15) (Coutín, D. y Brito, A., 1975).

Figura 32. Difractograma de una toba zeolitizada con fase predominante de mordenita y mordenita-heulandita procedente del yacimiento *Palmarito de Cauto*, en la provincia de Santiago de Cuba (Costafreda, J.L. y Martín, D., 2015).

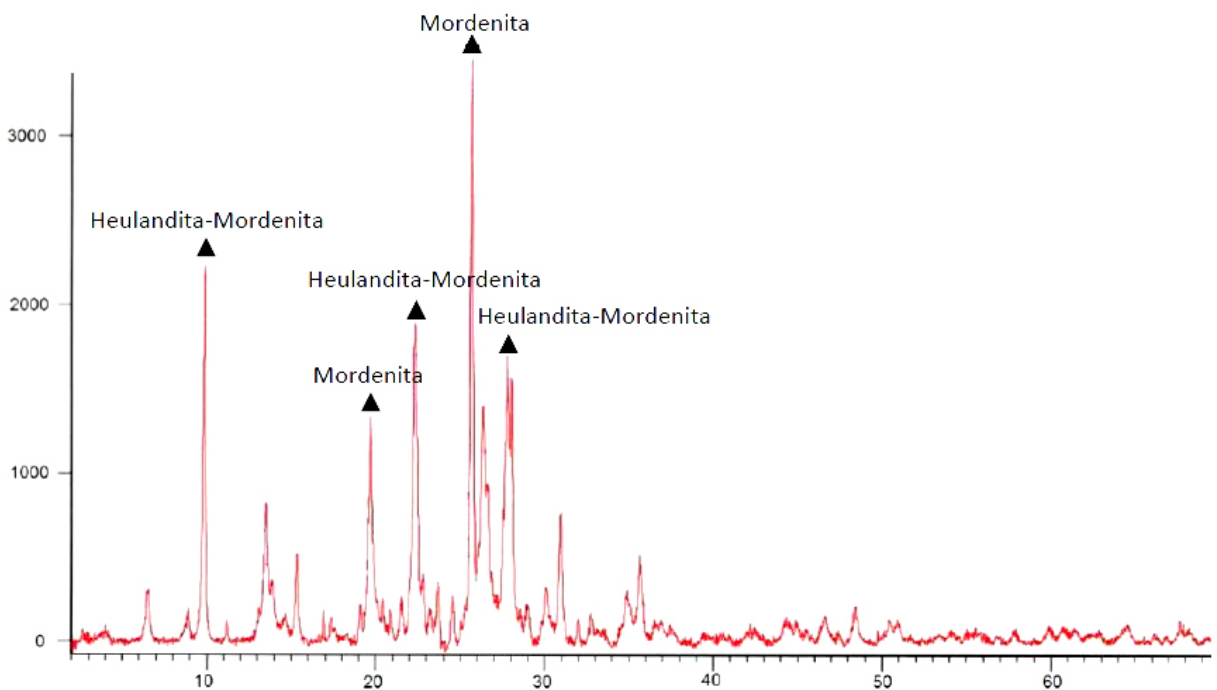


TABLA 15. COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO DE LAS TOBAS ZEOLITIZADAS DEL YACIMIENTO PALMARITO DE CAUTO, CON CONTENIDO DE MORDENITA QUE SUPERA EL 70%

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P.P.C.
<i>Palmarito de Cauto</i>	61,93	13,42	2,53	4,93	1,14	1,92	2,33	8,8

Tabla 15. Composición química promedio de las tobas zeolitizadas del yacimiento *Palmarito de Cauto*, con contenido de mordenita que supera el 70 por ciento (Orozco, G. y Rizo, R., 1998).

La mineralización se vincula directamente con tobas cristalolitoclásticas, muy alteradas a zeolitas, que se encuentran sobreyacidas por tufitas calcáreas, calizas tobáceas y calizas, e infrayacidas por conglomerados poli-oligomícticos. Los horizontes mineralizados, claramente policíclicos, tienen potencias variables entre diez y quince centímetros.

En la región más oriental de Cuba, en Guantánamo, se localiza el yacimiento *Palenque de Yateras* (tabla 11), muy próximo a una localidad de la que toma este nombre. Las principales variedades de zeolitas son la clinoptilolita y la mordenita, cuyos contenidos pueden llegar al 80 por ciento (tabla 16). Sus rocas encajantes son litologías tobáceas vitroclásticas de la extensa *Formación Sabaneta*, ya mencionada anteriormente, que han sido divididas en dos miembros principales, uno inferior y otro superior.

Tabla 16. Composición química en % en peso de tobas alteradas a zeolitas (1) y a montmorillonita (2) en *Palenque, Yateras* (Orozco, G., 1987).

TABLA 16. COMPOSICIÓN QUÍMICA EN % EN PESO DE TOBAS ALTERADAS A ZEOLITAS (1) Y A MONTMORILLONITA (2) EN PALENQUE, YATERAS

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P.P.C.
<i>Palenque de Yateras 1</i>	66,91	11,61	1,51	1,24	3,81	0,98	1,41	1,76	0,27	9,62
<i>Palenque de Yateras 2</i>	58,93	14,91	4,21	4,40	1,43	1,59	3,54	0,49	2,16	7,93

En el primer miembro ha predominado un proceso aloquímico de alteración del vidrio volcánico por cuenta de las aguas meteóricas y son, posiblemente, las responsables de la formación de montmorillonita, cuya abundancia puede alcanzar el 50 por ciento (Orozco, G., 1987).

En el segundo, en cambio, se ha producido un enriquecimiento anómalo en clinoptilolita y mordenita, según los datos ofrecidos por las investigaciones de Orozco, G. (1987), que establecen una relación pseudomórfica entre el vidrio preexistente y la zeolita neoformada a cuenta de su alteración. La formación de las variedades zeolíticas y los minerales arcillosos, como la montmorillonita, puede ser el resultado de la disociación natural de iones de magnesio y sodio, abundantes tras la

lixiviación del vidrio, en cuyo proceso el exceso en ión Mg^{2+} favorece la formación de montmorillonita, mientras que el Na^+ origina mordenita y clinoptilolita (Costafreda, J.L., 2008).

El yacimiento *Caimanes* se ubica en el extremo nororiental de Cuba (tabla 11), muy cerca de los municipios *Moa* y *Sagua de Tánamo* (figura 33).

Figura 33. Vista parcial del yacimiento *Caimanes*, en las inmediaciones de los municipios *Moa* y *Sagua de Tánamo*, en la provincia Holguín. En primer plano, detalles de las operaciones de desmuestra en uno de los frentes de explotación minera llevadas a cabo por profesores de la Universidad de Moa y de la Universidad Politécnica de Madrid (Fotografía: Costafreda, J.L.; Martín, D.A. y Costafreda, J.L. (Jr.), 2016).



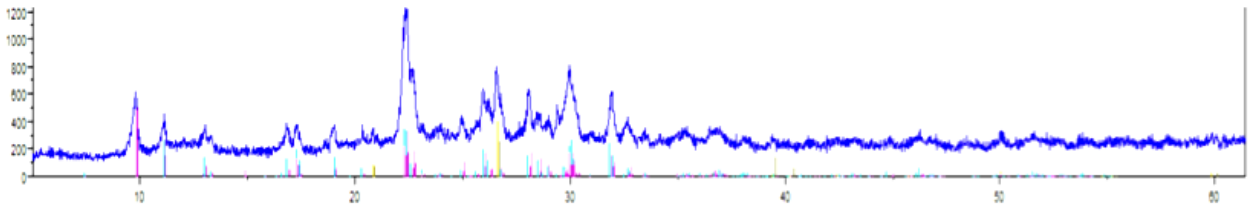


Figura 34. Diffractograma de una toba zeolitizada procedente del yacimiento *Caimanes* (Frazao-Ndumba, M. *et al.* 2007).

La mineralización de zeolita se vincula con los terrenos de las formaciones *Mícara* y *Sabaneta* (Orozco, G., 1996), y está representada mayoritariamente por clinoptilolita y heulandita cálcicas, ligeramente potásicas, con contenidos que varían entre el 80 y el 85 por ciento (figura 34).

Existe, al parecer, una fase minoritaria compuesta por mordenita, cuya abundancia no sobrepasa el 15 por ciento (Orozco, G., 1996), (Frazao-Ndumba, M. *et al.* 2007). Otras fases acompañantes, e igualmente subordinadas, son las que están compuestas por cuarzo (calcedonia), montmorillonita (13 y 14 por ciento) y vidrio volcánico.

Los criterios de los investigadores señalan que la clinoptilolita ha sustituido al vidrio volcánico al tiempo que es sustituida por mordenita (figura 35); aunque parte de este mineral pudo haberse formado a partir de procesos hidrotermales, como lo indica el hábito de los cristales y su tendencia a ubicarse en planos de grietas y anfractuosidades desarrolladas en la secuencia tobácea (figura 36) (Orozco, G., 1996), (Frazao-Ndumba, M. *et al.* 2007).

La composición química promedio de las tobas portadoras de zeolita, según Orozco, G. (1996) y Frazao-Ndumba, M. *et al.* (2007), es semejante a la calculada para las andesitas, aunque aquéllas poseen mayores contenidos en SiO_2 (tabla 17), al tiempo que son cálcicas, como ocurre con la mayoría de las rocas zeolitizadas cubanas.

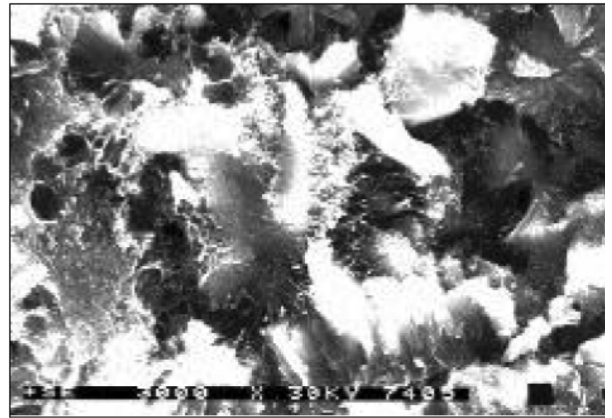


Figura 35. Microfotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido, mediante la cual es posible observar cómo los especímenes aciculares de mordenita crecen a expensas de la clinoptilolita. La clinoptilolita se encuentra a su vez sustituyendo al vidrio volcánico (Orozco, G., 1996) (Frazao-Ndumba, M. *et al.* 2007).

Figura 36. Microfotografía que muestra la profusión de cristales fibrosos de mordenita desarrollados en pequeñas grietas formadas en la muestra de toba zeolitizada del yacimiento *Caimanes*. 1 cm = 120 micras (Orozco, G., 1996) (Frazao-Ndumba, M. *et al.* 2007).

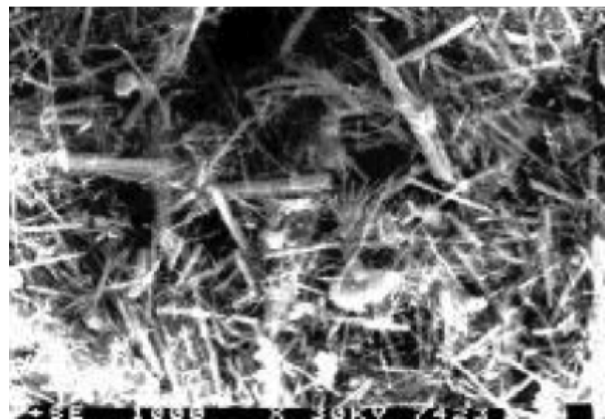


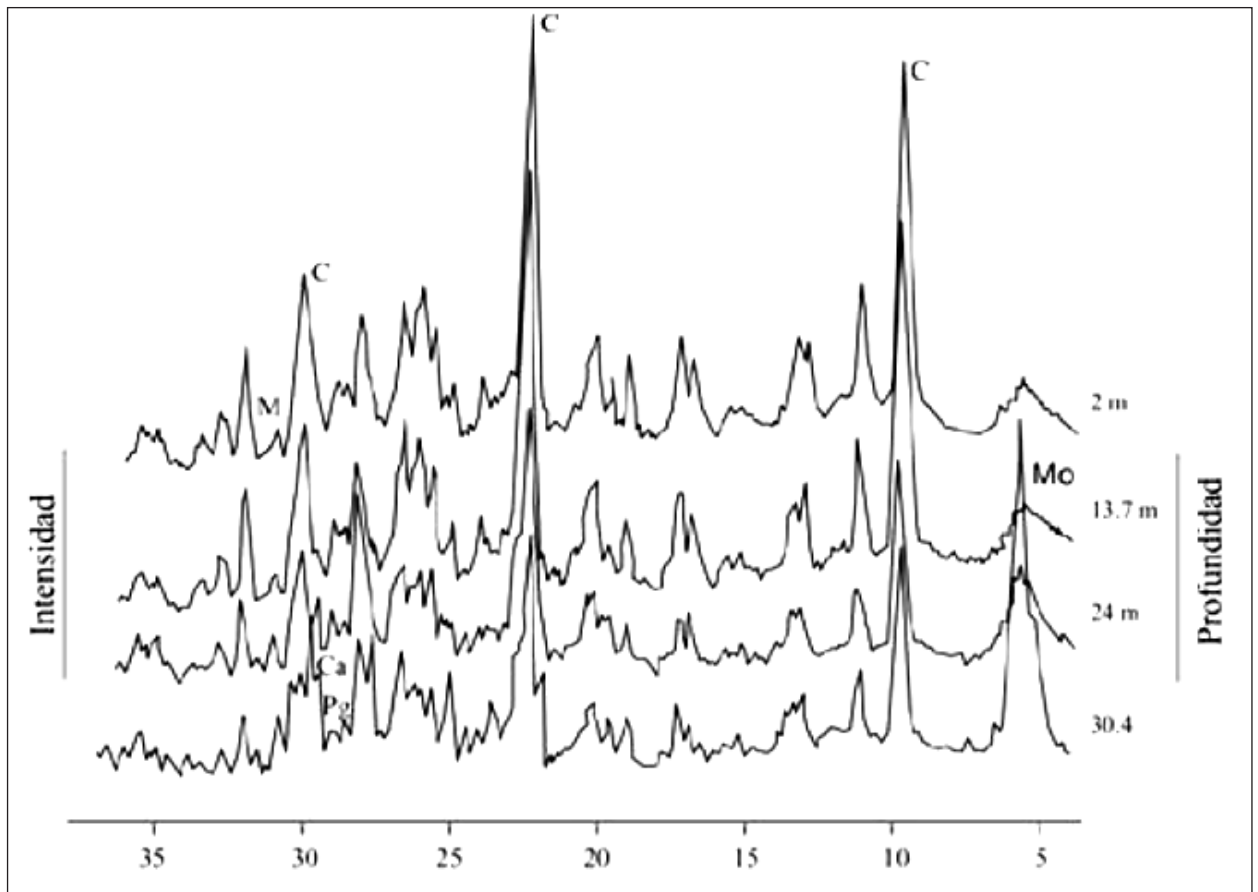
TABLA 17. COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO DE LAS TOBAS ZEOLITIZADAS DEL YACIMIENTO CAIMANES

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P.P.C.
<i>Caimanes</i>	59,87	13,41	2,91	0,97	6,32	1,48	1,45	1,42	11,07

Tabla 17. Composición química promedio de las tobas zeolitizadas del yacimiento *Caimanes*, según Orozco, G. (1996) y Frazao-Ndumba, M. et al. (2007).

Figura 37. Evolución de la mineralización en la medida que se profundiza en la columna estratigráfica del yacimiento *Caimanes*, donde C: clinoptilolita; Mo: montmorillonita; Ca: calcita; Pg: plagioclasa; M: mordenita (Orozco, G., 1996) (Frazao-Ndumba, M. et al. 2007).

Orozco, G. (1996) (figura 37) estableció que durante el proceso de alteración de las tobas, desde su estadio inicial donde aparecen los mayores contenidos de vidrio volcánico y álcalis hasta que devienen en rocas zeolitizadas, se produjo una disminución de los álcalis y un aumento de la sílice.



APLICACIONES DE LAS ZEOLITAS NATURALES DE CUBA

Cuba es sin lugar a dudas uno de los países pioneros en asignar el mayor número de aplicaciones a sus reservas de zeolitas naturales, y esta iniciativa es consecuencia de una necesidad que tiene su origen en el bloqueo económico impuesto por Estados Unidos desde los comienzos de la década de los sesenta. El gran abanico de usos se ha visto beneficiado, al mismo tiempo, por la innegable calidad de estos recursos.

Sin embargo, el empleo de las zeolitas en Cuba no es un hecho tan reciente; la crónica asegura que fueron utilizadas como materiales de construcción durante la época colonial, específicamente en la edificación de los antiguos edificios del Vedado (Casals, C., 1988). Según los registros históricos, fueron empleadas masivamente durante la crisis energética que se desencadenó durante la Segunda Guerra Mundial (Casals, C., 1988).

Fue en los comienzos de la década de los setenta cuando el gobierno cubano financió un proyecto de carácter técnico-económico, con el objetivo de desarrollar trabajos de prospección de detalle y explotación de los yacimientos de tobas zeolitizadas de la provincia de Villa Clara, a pesar de la inexistencia de normas mundiales para el desarrollo correcto de los trabajos de caracterización, normalización y usos. Con la emisión del primer informe, que aglutinó de forma magistral los resultados de los trabajos efectuados, quedó establecido por primera vez el estado de las reservas y los recursos de zeolitas naturales de Cuba, y la metodología adoptada para la prospección y explotación de estos minerales se convirtió en una guía de buenas prácticas, muy apreciada no sólo en Latinoamérica, sino también en Europa del Este y otras partes del mundo.

FUE EN LOS COMIENZOS DE LA DÉCADA DE LOS SETENTA CUANDO EL GOBIERNO CUBANO FINANCIÓ UN PROYECTO DE CARÁCTER TÉCNICO-ECONÓMICO, CON EL OBJETIVO DE DESARROLLAR TRABAJOS DE PROSPECCIÓN DE DETALLE Y EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE TOBAS ZEOLITIZADAS DE LA PROVINCIA DE VILLA CLARA.

La naturaleza geológica de Cuba, según se ha dicho en los párrafos precedentes, ha permitido la formación de yacimientos de zeolitas naturales en toda su geografía, y este hecho en sí, unido a la calidad tecnológica de estos minerales, representa un eslabón de máxima importancia que garantiza la explotación en puntos proximales a las plantas de procesamiento y los centros de consumo, con el consiguiente ahorro energético que esto representa.

En este capítulo se describen unos cuantos ejemplos de aplicaciones de las zeolitas naturales cubanas.

Velázquez, M. *et al.* (2007), junto a otros colaboradores del *Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica* (CIPIMM) de La Habana, lograron la comercialización de productos adsorbentes especiales a base de zeolitas naturales, mediante modificaciones físico-químicas de sus aluminatos, con el consecuente incremento de sus propiedades fisisorbentes, de intercambio iónico y de estabilidad química frente a sustancias con pH muy bajo. Su descubrimiento ha sido de especial utilidad en la remoción de Mn^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{4+} y Cd^{2+} en proporciones superiores al 95 por ciento.

Estos productos, comercializados bajo las nomenclaturas *Lithosand* y *Lithopool*, son empleados activamente en la actualidad en el tratamiento de agua,

de los parámetros establecidos por las autoridades sanitarias cubanas, al tiempo que se produjo un incremento positivo de los nutrientes y una rápida biodegradación de la materia orgánica.

La aplicación de este compost al cultivo de patatas, por citar un ejemplo, incrementó la producción en un 72%, en comparación con las estadísticas tradicionales, e intensificó el ahorro de urea en una tonelada por cada hectárea de terreno cultivable.

Las innovaciones de los citados investigadores se extendieron también al uso de zeolitas en el tratamiento de residuos urbanos, con importantes reducciones de los niveles de contaminación producidos por el alto contenido en metales pesados

LOS INVESTIGADORES CUBANOS HAN LOGRADO COMERCIALIZAR PRODUCTOS ADSORBENTES ESPECIALES A BASE DE ZEOLITAS NATURALES MEDIANTE MODIFICACIONES FÍSICO-QUÍMICAS DE SUS ALUMINATOS.

propiciando un gran ahorro de energía y una notable minimización de los costes generados por el mantenimiento y compra de productos químicos, otrora usados en el control de la dureza, la turbidez y la alcalinidad. Tampoco se requiere el empleo de floculantes, alguicidas ni supercolorantes.

Febles, J., *et al.* (2007) han empleado zeolitas en el tratamiento de residuos orgánicos, mediante su introducción sistemática en un compost fabricado a base de estiércol vacuno, para su uso como abono ecológico. La incorporación de zeolita en el compost incidió favorablemente en el comportamiento

y de bacterias patógenas, y con mayor eficacia en la desodorización y desinsectación. El producto obtenido de la fase final de biodegradación del compost, devino más rico desde el punto de vista nutricional, y es empleado con éxito en la reforestación a gran escala y en la jardinería, sin riesgo para la salud y el medio ambiente.

Rosell, M. (2007) convirtió en una buena práctica el uso de zeolita natural como aditivo en la producción de fibrocemento, mediante lo cual pudo valorar su eficacia como puzolana en la fabricación de asbesto-cemento.

Jordán, R. *et al.* (2007) emplearon zeolita de la variedad clinoptilolita-heulandita del yacimiento *Tasajeras, Villa Clara*, en la fabricación de vidrios sódico-cálcicos adecuados para la fabricación de botellas, valiéndose para ello de un tratamiento térmico que les permitió estudiar las principales variaciones físicas y químicas de la mezcla vitrificable hasta convertirse en vidrio. Tras un estudio comparativo de las curvas de viscosidad de la mezcla con una muestra patrón constituida por feldespatos, establecieron las ventajas del empleo de esta zeolita en la fabricación de vidrios de nueva generación.

Costafreda, J.L. (2008) empleó zeolitas naturales procedentes del yacimiento *Loma Blanca, San Andrés* (Holguín), en la fabricación de morteros, introduciendo en el proyecto de dosificación de las mezclas sustituciones de cemento pórtland por zeolita entre un 25 y un 30 por ciento, respectivamente. Los resultados de los ensayos físicos y mecánicos revelaron resistencias normales a compresión superiores a los 50 megapascales, en tan sólo 28 días de fraguado.

La Empresa Geominera de Oriente, ubicada en Santiago de Cuba, está aplicando un novedoso sistema en el tratamiento de aguas (Pla, O., 2009), mediante el uso de zeolitas naturales como floculante. En este sistema ha logrado sustituir el sulfato de alúmina por zeolita, logrando una reducción del consumo de este compuesto entre el 20 y el 30 por ciento, que les reporta un ahorro de alrededor de 115.000 dólares anuales. El control de los parámetros de turbidez se lleva a cabo con similar eficacia que en los procesos tradicionales.

En la industria azucarera cubana, la zeolita natural sódica ha encontrado importantes aplicaciones en los procesos de clarificación de jugos, con la consiguiente disminución del color y de la turbidez, y con un aumento de la velocidad de sedimentación y concentración del jugo de caña (Gómez, L. *et al.* 2011). La filtración de la meladura cruda en un lecho de zeolita permitió a estos investigadores introducir variaciones en el color, la turbidez y en los contenidos de los *no-azúcares* hasta niveles superiores a los tradicionales, y con un apreciable beneficio económico.

La empresa porcina ha introducido en su línea de producción el módulo de crianza no convencional de cerdos, basado básicamente en el empleo de zeolita natural con gran éxito (Pérez, O., 2011). El uso de zeolitas naturales en su variedad comercial *Zoad*, al 5 por ciento, y mezclada con el 95 por ciento del alimento concentrado, ha permitido controlar con eficacia los procesos diarreicos y enteropatías en cerdos no amamantados. Este producto fue mezclado a su vez con el alimento alternativo (melazas, productos lácteos, viandas, restos vegetales y desperdicios de alimentos) en dosificaciones del 10 y el 20 por ciento, acelerando su homogeneización y maduración en tiempo récord, y preservó la masa alimenticia de organismos patógenos, responsables de los brotes de diarrea. El empleo del producto comercial a base de zeolita conocido como *Fertisol*, sustituyó completamente la tradicional fibra de caña de azúcar (*bagazo*) y del serrín de madera en los lechos de porcinos, con la consiguiente erradicación de los malos olores y el control de moscas, larvas y gusanos.

La zeolita cubana se emplea ampliamente como adición mineral en los hormigones, teniendo en cuenta su influencia en la formación de aluminatos cálcicos (Rosell, M., 2009). La utilización de zeolitas como puzolanas naturales en la industria del cemento, hormigones y morteros ha permitido incrementar el rendimiento y la vida útil de las cementeras cubanas, con el concomitante ahorro económico y la mejora medioambiental que esto supone. Tanto las patentes aprobadas como las nuevas innovaciones, demuestran que el uso de zeolita molida hasta fracciones inferiores a los 0,8 milímetros garantiza una excelente durabilidad de los hormigones, traducido en una mejor compactación y en el incremento de fases mineralógicas física y químicamente más resistentes que la portlandita. Con este criterio, Pérez, O. *et al.* (2013) han logrado reducir el uso de cemento pórtland entre el 12 y el 20 por ciento, mante-

niendo inalterable su calidad. De este modo, ya se fabrican hormigones armados y losas huecas a escala industrial, con una mayor coherencia, un mejor acabado y un correcto recubrimiento del acero para su protección contra la corrosión, preferentemente en vías férreas.

Almenares, R. *et al.* (2013) emplearon tobas vítreas y zeolitizadas en mezclas de morteros dosificadas en un 15 y un 30 por ciento en peso. Como resultado de estas operaciones, obtuvieron morteros con resistencias mecánicas adecuadas en períodos cercanos y superiores a los 28 días. Los índices de actividad resistente superaron en todos los casos el 75% establecido por la norma. Actualmente se comercializa esta patente en los proyectos de fabricación de viviendas de bajo coste en los municipios más orientales de la provincia Holguín.

UNA BUENA PRÁCTICA EN CUBA ES EL USO DE ZEOLITA NATURAL COMO ADITIVO EN LA PRODUCCIÓN DE FIBROCEMENTO, SIENDO UNA PUZOLANA IDÓNEA PARA LA FABRICACIÓN DE ASBESTO-CEMENTO. ADEMÁS, SE EMPLEAN EN LA FABRICACIÓN DE VIDRIOS SÓDICO-CÁLCICOS ADECUADOS PARA LA FABRICACIÓN DE BOTELLAS.

Los científicos cubanos han empleado la zeolita natural, en su variedad clinoptilolita purificada y modificada, en el tratamiento de las patologías de pacientes diabéticos con enfermedades vasculares periféricas, tras establecer su magnífica propiedad como antihiper glucemiante. El tratamiento se realiza mediante un fármaco de nueva generación conocido como Fe_2 -*Clinoptilolita*, o simplemente FZ, que cumple con las prescripciones de las normas médicas cubanas (Fleitas, A. y Rodríguez, G., 2007). Este fármaco tiene la propiedad de disminuir selectivamente la concentración de glucosa en disolución, frente a otros carbohidratos como la sacarosa y la fructosa.

Buenaño, X. *et al.* (2016) llevaron a cabo con éxito trabajos de investigación consistentes en el empleo de muestras de zeolitas del yacimiento *Tasajeras (Villa Clara, Cuba)* para el tratamiento de aguas ácidas procedentes de la actividad minera en los alrededores de Guayaquil, en Ecuador. Los cationes eliminados fueron el Mn^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} y el Al^{3+} .

Martín, D. *et al.* (2017) han sometido varias muestras de zeolitas procedentes de los yacimientos *Palmarito de Cauto* y *Tasajeras* a procesos de modificación ácida, con el propósito de aumentar su capacidad de adsorción para su empleo en la mejora del medio ambiente. Los resultados alcanzados indican un incremento de esta capacidad desde el 14,40 y el 14,28 por ciento al 73,86 y al 86,82 por ciento para ambos yacimientos, que representa el 59,46 y el 72,54 por ciento, respectivamente.

Desde el año 2015, la Escuela de Minas y Energía de Madrid (Martín, D.A. *et al.* 2015; Martín, D.A. *et al.* 2016), conjuntamente con el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, está desarrollando trabajos de investigación para la caracterización de materiales puzolánicos en la región de Holguín y su aplicación en la elaboración de cementos para la fabricación de viviendas de bajo coste. Estas investigaciones comprenden una amplia variedad de recursos naturales entre los que, además de zeolitas, pueden mencionarse las perlititas, las arcillas caoliníferas, las tobas vítreas, las tobas riolíticas y el vidrio volcánico.

Los resultados obtenidos hasta el momento establecen el marcado carácter puzolánico de los recursos mencionados, específicamente de las tobas zeolitizadas de los yacimientos *Caimanes (Sagua de Tanamo)* y *Loma Blanca (San Andrés, Holguín)*. Asimismo, han demostrado que los cementos puzolánicos elaborados a partir de estos materiales cumplen con los principales requisitos exigidos por las normas, principalmente en lo concerniente al índice de actividad resistente, densidad, coeficiente de absorción, contenidos en óxido de magnesio, residuos insolubles, sílice total y reactiva, entre otros importantes parámetros normalizados (Costafreda, J.L. *et al.* 2017).

Además de estas líneas de investigación, las zeolitas naturales de los yacimientos más conocidos de la región oriental de Cuba se están empleando como intercambiadores catiónicos en la captación de metales de tierras raras (Cháves, S. *et al.* 2017).

LAS ZEOLITAS NATURALES PROCEDENTES DEL YACIMIENTO LOMA BLANCA, SAN ANDRÉS (HOLGUÍN), SE HAN EMPLEADO CON ÉXITO EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTOS, MORTEROS Y HORMIGONES CON RESISTENCIAS NORMALES A COMPRESIÓN SUPERIORES A LOS 50 MEGAPASCALES, EN TAN SÓLO 28 DÍAS DE FRAGUADO.

BIBLIOGRAFÍA

- Almenares, R. y Leyva, C. (2013). Evaluación de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia de Holguín para su utilización como puzolana natural. V Congreso cubano de Minería (Minería '2013). V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias '2013. La Habana, Cuba. Del 1 al 5 de abril de 2013. ISSN 2307-499X.
- Álvarez, T. (1990). Informe final sobre la búsqueda, exploración orientativa y detallada del yacimiento San Cayetano, Municipio Jimaguayú, provincia Camagüey. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, 52 pp.
- Brito, A. y Coutín, D. (2017). Panorámica del estudio de las zeolititas de Cuba, desde los inicios hasta la actualidad. XII Congreso de Geología. VII Convención de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2017. La Habana, Cuba. Págs. 821-838.
- Bolívar, G. (1989). Informe preliminar sobre los trabajos de exploración orientativa y detallada en el yacimiento de zeolitas Bueycito, provincia Granma. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 34 pp.
- Buenaño, X., Canoira, L., Martín, D. y Costafreda, J.L. (2016). Zeolitic tuffs for acide mine drainage (AMD) treatment in Ecuador: Break through curves for Mn^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} and Al^{3+} . Environmental Science and Pollution Research. 11 pp.
- Casals, C. (1988). Las zeolitas. Mineral del siglo XX. Usos y aplicaciones. Centro Nacional de Producción de Animales de Laboratorio (CENPALAB). Holguín, Cuba. Ediciones Publicigraf. 24 pp.
- Cháves, S.; Canoira, L.; Martín, D.A.; Costafreda, J.L. y Del Barrio, S. (2017). Cation exchange tests of natural zeolites with rare earth elements. XII Congreso Nacional de Geoquímica. XI Congreso Ibérico de Geoquímica. Del 26 al 28 de septiembre de 2017. Linares, Jaén (España).
- Costafreda, J.L.; Presa, L.; Martín, D.A.; Leyva, C. y Costafreda, J.L. (Jr.) (2017). Características de las rocas zeolitizadas de la región oriental de Cuba, y sus aplicaciones en la elaboración de cementos. XII Congreso Nacional de Geoquímica. XI Congreso Ibérico de Geoquímica. Del 26 al 28 de septiembre de 2017. Linares, Jaén (España).
- Costafreda, J.L. (2008). Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). Tesis Doctoral. E.T.S.I. Minas. Universidad Politécnica de Madrid (España). 515 p.
- Coutín, D., Brito, A. (1975). Características de la zeolitización en rocas sedimentarias de origen volcánico en Cuba oriental.
- Febles, J., Escobar, L. y Carreau, J. (2007). Empleo de la zeolita natural en el tratamiento de residuales orgánicos. II Congreso de minería (minería '2007) / Minimetall III Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. La Habana, Cuba. 8 pp.
- Fleitas, A., Rodríguez, G. (2007). Zeolitas naturales de utilidad en la práctica médica. Monografía del Instituto Nacional de Angiología y Cirugía Vasculat. La Habana, Cuba / Instituto Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad de La Habana. Cuba. 17 pp.

- Földessy, J. (1988). Prospección detallada de los sectores Loma Blanca y La Mula, escala 1:10.000. Polígono IV CAME-Holguín. Ministerio de Industria Básica. 20 págs.
- Frazao-Ndumba, M., Orozco, G., Coello-Velázquez, A. y Aguado Menéndez, J.M. (2007). Caracterización mineralógica de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes para su beneficio por molienda diferencial. *Minería y Geología*, vol. 23, núm. 4, octubre-diciembre, 2007, pp. 1-18. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr. Antonio Núñez Jiménez' Cuba.
- Freyre, F. (1984). Estudio de las vulcanitas Pre-Maestrichtiano de las montañas del Este de Holguín. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 65 pp.
- García, M. (1988). Nuevos datos sobre los trabajos de prospección geológica en el yacimiento Zeolitas Tasajeras. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa. 38 pp.
- Gómez, L., Fuentes, R. y Navarro, B. (2011). Influencia de la zeolita natural en la intensificación de la tecnología para la obtención de azúcar de caña. *IV Congreso cubano de minería (Minería '2011) / V Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. Cuarta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias '2011. La Habana, Cuba*. ISBN 978-959-7117-30-8.
- González, I. (1987). Exploración orientativa y detallada del Sector I, yacimiento Tobas Siguaney. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa. 52 pp.
- Iturralde-Vinent, M. (1996). Introduction to Cuban Geology and tectonics. In M. Iturralde-Vinent (ed.). *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*, Miami, 3-35.
- Iturralde-Vinent, M. (1996). Cuba: el archipiélago volcánico Paleoceno-Eoceno Medio. In M. Iturralde-Vinent (ed.). *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*, Miami, 231-246.
- Iturralde-Vinent, M., Millán, G. y Kozák, M. (1996). Estratigrafía del Arco Volcánico Cretácico en Cuba. In M. Iturralde-Vinent (ed.). *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*, Miami, 190-230.
- Jordán, R., Rodríguez-Fuentes, G. y Rodríguez, Y. (2007). Aportes de la zeolita (clinoptilolita-heulandita) del yacimiento "Tasajeras" a la química de los vidrios sódico-cálcicos. *II Congreso de minería (minería '2007) / Minimetall III Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. La Habana, Cuba*.
- Martin, D.A., Costafreda, J.L., Leyva, C. y Costafreda, J.L. (Jr) (2015). Proyecto de Investigación y Desarrollo para la caracterización de materiales puzolánicos de la región de Holguín y su aplicación en la elaboración de cementos para la fabricación de viviendas de bajo coste. Universidad Politécnica de Madrid. Resolución rectoral de 11 noviembre de 2014.
- Martin, D.A., Costafreda, J.L., Leyva, C. y Costafreda, J.L. (Jr) (2016). Proyecto de Investigación y Desarrollo para la continuación de los trabajos de caracterización de materiales puzolánicos de la región de Holguín y su aplicación en la elaboración de cementos para la fabricación de viviendas de bajo coste. Universidad Politécnica de Madrid. Resolución rectoral de 28 de octubre de 2015.
- Martín, D.; Velázquez, M.; Huertemendía, M.; Hidalgo, E.; Casanova, A. y Jorrín, S. (2017). Modificación ácida de las zeolitas naturales para el mejoramiento de su capacidad

- de adsorción. *XII Congreso de Geología. VII Convención de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2017. La Habana, Cuba.* Págs. 839-851.
- Orozco, G. (1996). Caracterización geólogo-mineralógica del yacimiento de tobas zeolitizadas Caimanes, Moa, Holguín. *Minería y Geología*, 13(3), 27-35.
- Orozco, G. y Rizo, R. (1998). Depósitos de zeolitas naturales de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, V. 33 (1998), N° 1-4. pp. 335-349.
- Pentelényi, L., Garcés, E. (1988). Informe del Levantamiento Geológico Complejo de la Región Noroeste de la provincia Holguín, Cuba. Polígono IV CAME-Holguín. Ministerio de Industria Básica. 550 págs.
- Pérez, O. (1991). Características generales de los yacimientos de zeolitas Carolina I y II. Libro de resúmenes. *3ª Conferencia Internacional sobre la presencia, propiedades y utilización de zeolitas naturales, Habana, Cuba.*
- Pérez, O. (2011). Utilización de productos de zeolitas en la cría no convencional de cerdos. *IV Congreso cubano de minería (Minería '2011) / V Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. Cuarta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias '2011. La Habana, Cuba.* ISBN 978-959-7117-30-8.
- Pérez, O., Carballo, D. y Ruiz, S. (2013). Generalización de la utilización de zeolita menor de 0.8 mm en la elaboración de hormigones. *V Congreso cubano de Minería (Minería '2013). V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias '2013. La Habana, Cuba.* Del 1 al 5 de abril de 2013. ISSN 2307-499X.
- Pla, O. (2009). La utilización de la zeolita y/o el vidrio volcánico como agente floculante en las plantas de tratamiento de agua. *III Congreso de minería (Minería '2007) / IV Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. La Habana, Cuba.*
- Rosell, M. (2007). Influencia del tamaño de partícula de zeolita en su actividad puzolánica. *II Congreso de minería (minería '2007) / Minimetall III Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. La Habana, Cuba.* 9 pp.
- Rosell, M. (2009). Zeolita como adición mineral activa en la producción de fibrocemento. *III Congreso de Minería (MINERIA '2007) / IV Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. Tercera Convención Cubana de Ciencias de La Tierra, Geociencias '2009. La Habana, Cuba.* ISBN 978-959-7117-19-3.
- Torres, J. (1987). Evaluación geológica y algunos resultados tecnológicos de las zeolitas en Camagüey. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 76 pp.
- Velázquez, M., Rodríguez, T., Alonso, J.A., Montejo, E., Febles, J., Villavicencio, B., Marzán, A. y Berto, J. (2007). Aplicaciones de los productos adsorbentes especiales a partir de las zeolitas naturales en la protección del medio ambiente. *II Congreso de minería (minería '2007) / Minimetall III Taller de zeolitas naturales, usos y aplicaciones. La Habana, Cuba.* 9 pp.