

Estudio de seis tipos de Ónix Mexicano para determinar su uso potencial como blindaje contra fotones ionizantes

Claudia Angélica Márquez Mata¹, Héctor René Vega Carrillo¹ & Ma. Jesús Mata Chávez²

¹ Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Estudios Nucleares
Cipres 10, Fracc. La Peñuela, 98060 Zacatecas, Zac, México

² Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra
Av. Universidad 108, Progreso 98050 Zacatecas, Zac. México.

Buzón-e: angiemata20@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presentan algunos rasgos principales del Ónix Mexicano así como la determinación de las características de las 6 muestras procedentes del semi-desierto Zacatecano correspondiente al municipio de Mazapil, las cuales se clasifican de acuerdo a su color representativo, Amarillo, Azul, Café, Naranja, Rojo y Verde. Las técnicas de caracterización que se estudiaron son las siguientes: Espectroscopia de Energía Dispersa de Fluorescencia de Rayos X, Espectrometría Ultravioleta Visible y Espectroscopia Infrarroja. Con dichas técnicas se logró estudiar las características químicas, físicas y ópticas del Ónix Mexicano; de donde se obtuvo la composición elemental, los picos de absorción, los modos vibracionales y el band gap óptico. Al igual que se estudió las interacciones de estos materiales con la radiación. De este último estudio se obtuvo el coeficiente de interacción másico para la dispersión coherente e incoherente, el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y producción de pares, en el núcleo y el campo de electrones, al igual que el coeficiente de atenuación másico total y lineal total para las 6 muestras, esto con el fin de determinar su capacidad como blindaje.

Keywords: Ónix Mexicano, Calcitas, Caracterización, UV-Vis, EDX, IR Coeficientes másicos y lineales.

1.- INTRODUCCION

El estado de Zacatecas cuenta con una gran variedad de riquezas naturales, entre las cuales se tiene una gran variedad de minerales no metálicos, tales como: fosforita, manganeso, cuarzo, perlita y canteras. Dentro de las canteras se encuentran los mármoles, travertinos y ónix. Este último mineral se conoce internacionalmente como Ónix Mexicano, esto debido a que fue en México donde se identificó por primera vez, debido a que en este país se tienen vastos recurso con características de gran calidad y belleza. El ónix es una roca cristalina de carbonatos de calcio, y proporciones menores de óxidos y protóxidos de fierro y manganeso que le dan las distintas tonalidades a las franjas de que está compuesta (Mata-Chávez, 1993).

El Ónix Mexicano (CaCO_3) perteneciente al grupo de las calcitas, el cual se encuentra en rocas sedimentarias. Algunos de los minerales asociados al ónix son la siderita, el cuarzo, la pirita, la prehnita, la fluorita, la dolomita y la baritina (Mata-Chávez, 1993).

En estudios previos se ha determinado que el origen de los yacimientos de ónix mexicano se relaciona estrechamente con la circulación de las aguas subterráneas, las cuales están determinadas por la filtración de las aguas superficiales y las aguas meteóricas al subsuelo. Estas últimas son de gran importancia por la gran cantidad de CO_2 que recogen de la atmosfera lo que da lugar a la formación de ácido carbonítico, compuesto que permite con mayor facilidad la erosión de las rocas que atraviesa, otro factor que influye es el gradiente de temperatura (Olvera et al., 1989).

La diversidad de partículas disueltas en las aguas, varían por la secuencia de rocas que atraviesan, las cuales ya enriquecidas tienden a subir, buscando lugares que sean favorables para la liberación de presión, los cuales pueden ser fracturas o fallas, en donde se realiza la precipitación de los componentes disueltos al encontrar condiciones fisicoquímicas idóneas para tal proceso, dando lugar a la formación de yacimientos de ónix en forma de veta (Olvera and Nuñez, 1992).

El sistema cristalino del ónix mexicano es hexagonal romboédrico, con un brillo vítreo, donde su color depende de las impurezas existentes lo que también define las distintas variedades; cuenta con una dureza en la escala de Mohs de 3. Su exfoliación es muy perfecta, en tres planos oblicuos que siempre originan fragmentos romboédricos, por lo que se anula la fractura concoidea. La densidad que se registra varía de 2.6 a 2.8 g/cm³.

El ónix es un mineral anisotrópico presenta birrefringencia, es decir, tienen dos índices de refracción provenientes de los rayos polarizados separados. Los índices de refracción presentes son $N_{\epsilon}=1.658$, $N_{\omega}=1.486$. Las maclas más comunes encontradas en el mineral son lamelares $\{01-12\}$, y unas más simples y comunes como $\{0001\}$. Con relieve medio alto, y un signo óptico uniáxico (-) (Mata-Chávez, 1993, Crespo, 2016).

En la literatura se reportan constantemente estudios para determinar las características como blindajes de distintos materiales (El-Khayatt, 2017, El-Khayatt et al., 2014, Ermis and Celiktas, 2015). Algunos de estos materiales son los que se usan en la construcción (Mann et al., 2013, Akbulut et al., 2015), minerales naturales como el Cuarzo, Pirita, Cantera y distintas Calcitas (Han et al., 2009, Zhou et al., 2018, Oto et al., 2015, Vega-Carrillo et al., 2018), plásticos y polímeros (Mann et al., 2015, Li et al., 2017), así como diferentes concretos con sus distintos agregados (Rezaei-Ochbelagh and Azimkhani, 2012, Liu and Wang, 2017, Pedro et al., 2017, Khodabakhshian et al., 2018). En estos estudios las características de los materiales que se usan con mayor frecuencia son el coeficiente de atenuación lineal, el coeficiente de atenuación másico, el número atómico efectivo, el espesor hemireductor, entre otros. Los métodos que se utilizaron para obtener estos valores van desde cálculos hasta procedimientos experimentales, o en la mayoría de los casos ambos.

El ónix se usa para hacer piezas de ornato, en la joyería y como elemento decorativo en la industria de la construcción. A pesar de que México es el mayor productor de ónix en el mundo, solo pocas características han sido determinadas.

Dado que la densidad del ónix es similar a la del concreto tipo Portland, es posible que se pueda usar como blindaje o bien como aditivo del concreto.

En la zona del semi-desierto del estado de Zacatecas existen yacimientos de ónix; esta zona incluye desde la comunidad de Nuevo Mercurio hasta la cabecera municipal Mazapil. De esta zona se obtuvieron las muestras de seis tipos de Ónix Mexicano (Amarillo, Azul, Café, Naranja, Rojo y Verde) con el objetivo de caracterizarlos y determinar su uso potencial como blindaje contra fotones ionizantes (rayos X y rayos γ).

2.- MATERIALES Y METODOS

2.1.- Preparación de las muestras y Caracterización

Las muestras se preparan dependiendo de la caracterización que se le realizara. De la veta de ónix se tomaron muestras representativas de los 6 tipos. Las muestras se trituraron para determinar su composición elemental y sus propiedades con el infrarrojo. Para la caracterización en el visible y el ultravioleta se obtuvieron láminas delgadas.

Para trituración y pulverización de las muestras se tomó cerca de 250 g, lo cual se pasó a triturar con un mortero esto para obtener partículas de aproximadamente 0.5 cm de diámetro. La muestra triturada se lavó con agua y se dejó secar, para después pasar a una maquina pulverizadora que la redujo a 400 mallas.

Para la obtención de las láminas delgadas se pulió uno de los lados de la muestra con Bromuro de Tungsteno con un grano de 180, hasta obtener una cara lisa; a continuación se procedió a pegar la muestra por el lado pulido a un porta objetos de vidrio con pegamento Bálsamo de Canadá, con el fin de desbastar la muestra lo más delgado posible. Se continuo con el pulido de la muestra con una grano de 400 de Bromuro de Tungsteno, hasta terminar con un grano de 800, esto para llegar a su grosor final, para al final despegar del porta objetos y terminar limpiando la lámina con acetona pura, para su posterior caracterización. En la

tabla 1, se muestra el espesor de cada lámina de los diferentes tipos de ónix que se caracterizaron por UV-Vis.

Tabla 1. Espesor de las láminas de ónix para espectrometría UV-Vis.

Ónix	Espesor [mm]
Amarillo	1.0
Azul	0.8
Café	1.3
Naranja	1.0
Rojo	0.8
Verde	2.1

De cada tipo de ónix se prepararon muestras representativas con el fin de determinar su concentración elemental, que se obtuvo mediante la espectroscopia de energía dispersada de fluorescencia de rayos X (EDX). Para esto se usó espectrómetro de la marca Rigaku, modelo NEX QC⁺ QuantEZ. Este equipo usa un equipo de rayos X de 50 kV que opera con una potencia de 4 watts y las muestras se midieron en atmósfera de helio.

Por la espectrometría ultravioleta visible (UV-Vis) se obtuvo el rango de absorción y el *band gap*, para el ónix mexicano. Esto se hizo con un espectrofotómetro UV-Vis de la marca Perkin Elmer precisely modelo lambda 35 con rango de 190-1100 nm.

También se usó el espectrofotómetro infrarrojo mediante Transformada de Fourier (FTIR) con rango de medición de 400-4000 cm^{-1} . Mediante la espectroscopia infrarroja (IR) se obtuvieron las frecuencias de vibración normales en cm^{-1} en la forma amorfa y en tres formas cristalinas del carbonato de calcio.

Los coeficientes de interacción de fotones ionizantes y las muestras de ónix se calcularon mediante el código XCOM. En esta caracterización se determinaron los coeficientes másicos de interacción para la dispersión Coherente, el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton,

la producción de pares en el campo nuclear y la producción de pares en el campo electrónico para fotones de 10^{-3} a 10^5 MeV.

3.- RESULTADOS

La composición elemental de las muestras de ónix mexicano amarillo, azul, café, naranja, rojo y verde obtenido de la zona del semi-desierto de Zacatecas que se obtuvo mediante EDX se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.- Composición elemental de las muestras de ónix mexicano.

Elemento	Fracción de peso (%)					
	Amarillo	Azul	Café	Naranja	Rojo	Verde
C	17.10±0.05	16.71±1.68	14.86±0.39	18.29±0.50	13.48±0.44	17.93±0.39
O	56.46±0.08	55.05±3.36	52.76±0.62	57.26±0.34	50.88±0.67	57.58±0.64
Mg	0.24±0.02	0.05±0.02	-	0.37±0.06	0.15±0.04	0.58±0.06
Si	0.06±0.01	0.09±0.01	0.06±0.03	-	0.10±0.10	0.12±0.01
S	0.39±0.02	0.04±0.03	0.06±0.05	0.10±0.01	-	-
Ca	21.81±0.09	23.55±0.24	31.00±0.95	22.93±0.21	34.22±0.58	22.81±0.91
Cu	0.24±0.02	0.43±0.03	0.54±0.15	0.53±0.06	0.46±0.02	0.34±0.06
Zn	0.15±0.05	0.29±0.01	0.29±0.06	0.25±0.02	0.26±0.05	0.19±0.02
Sr	0.37±0.02	0.62±0.01	0.20±0.12	-	0.18±0.02	0.31±0.05
Y	0.17±0.03	0.18±0.02	0.22±0.05	0.13±0.02	0.26±0.04	0.14±0.01

En la figura 1 se muestran los espectros de absorción obtenidos con el UV-Vis, para ondas electromagnéticas de 190 a 1100nm para cada una de las muestras de ónix obtenidos. En la Figura 2 se muestran los espectros IR del ónix, de donde se puede observar que el mayor rango esta entre 1174 a 1770 cm^{-1} . En las figuras 3 a 8 se muestran los coeficientes másicos de interacción para la dispersión Coherente, la absorción fotoeléctrica, la dispersión Compton y la producción de pares (en el campo eléctrico del núcleo y de los electrones orbitales).

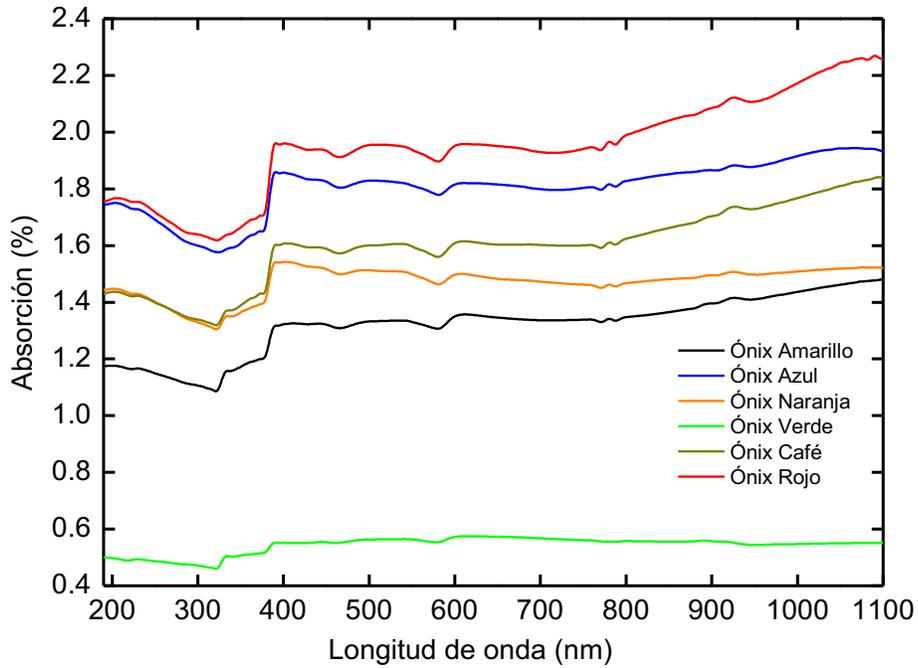


Figura 1.- Espectro UV-Vis de las muestras.

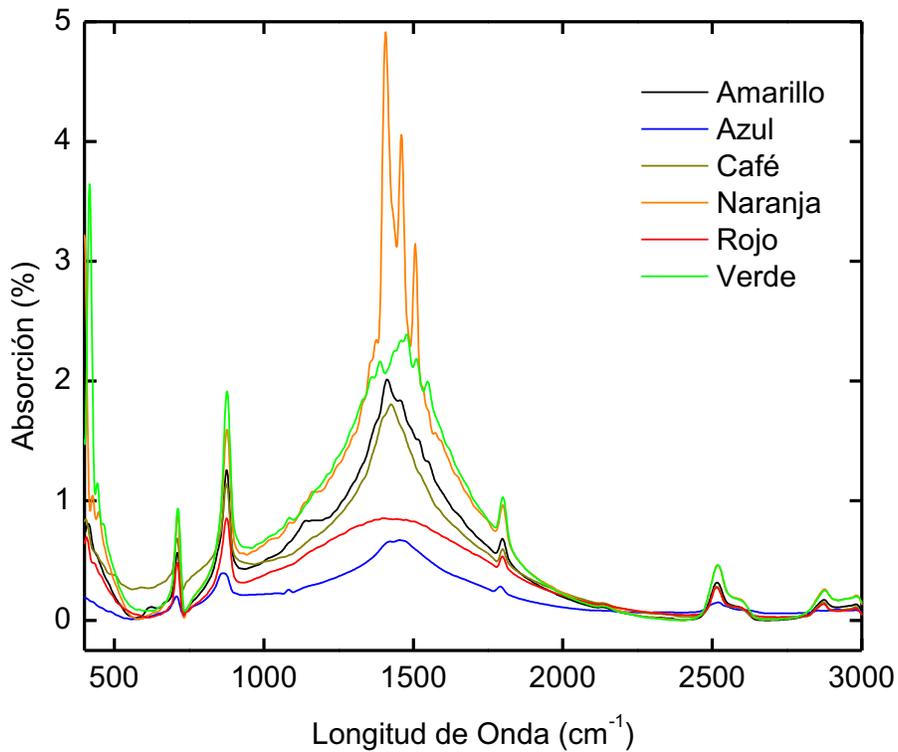


Figura 2.- Espectro IR de las muestras

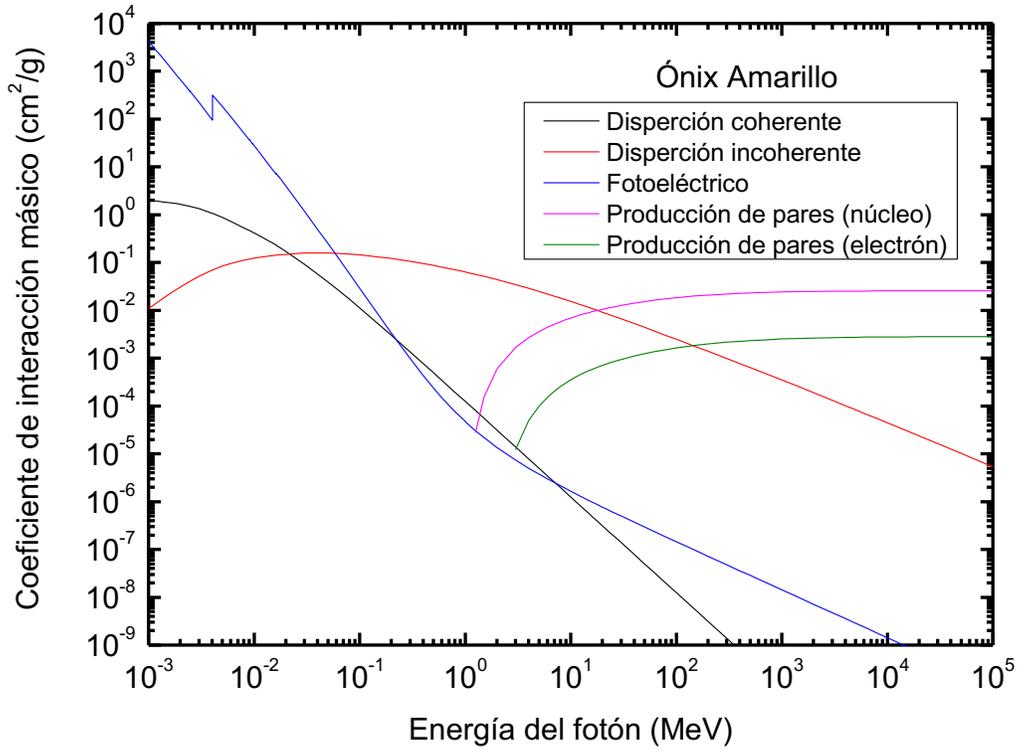


Figura 3.- Coeficientes másicos de interacción para el ónix amarillo

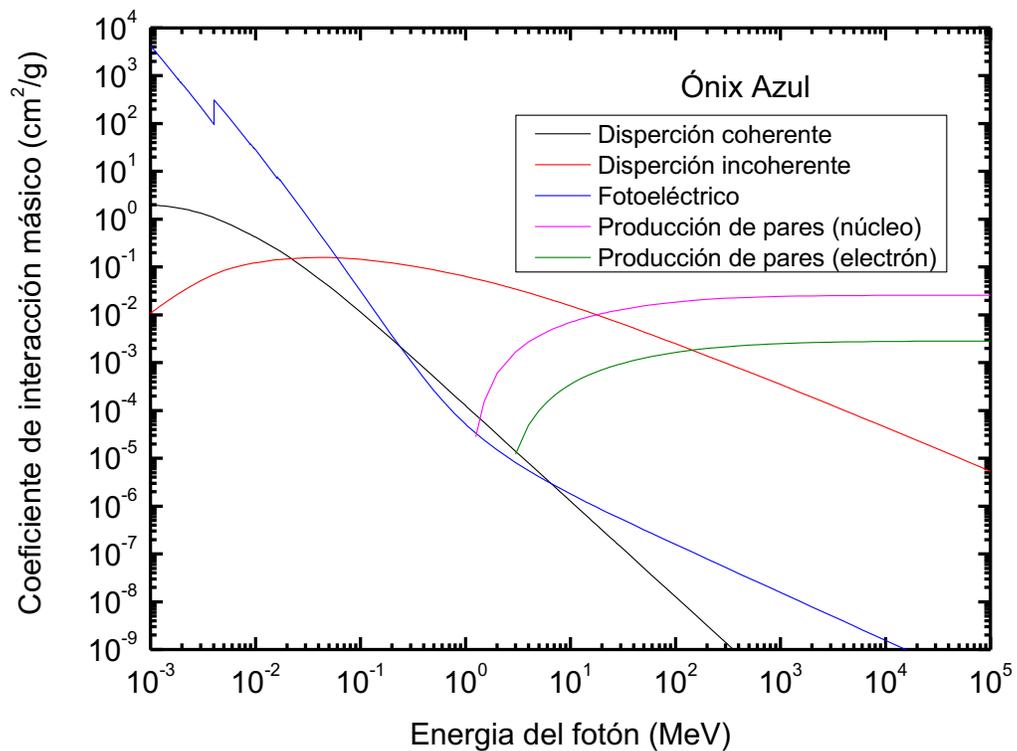


Figura 4.- Coeficientes másicos de interacción para el ónix azul

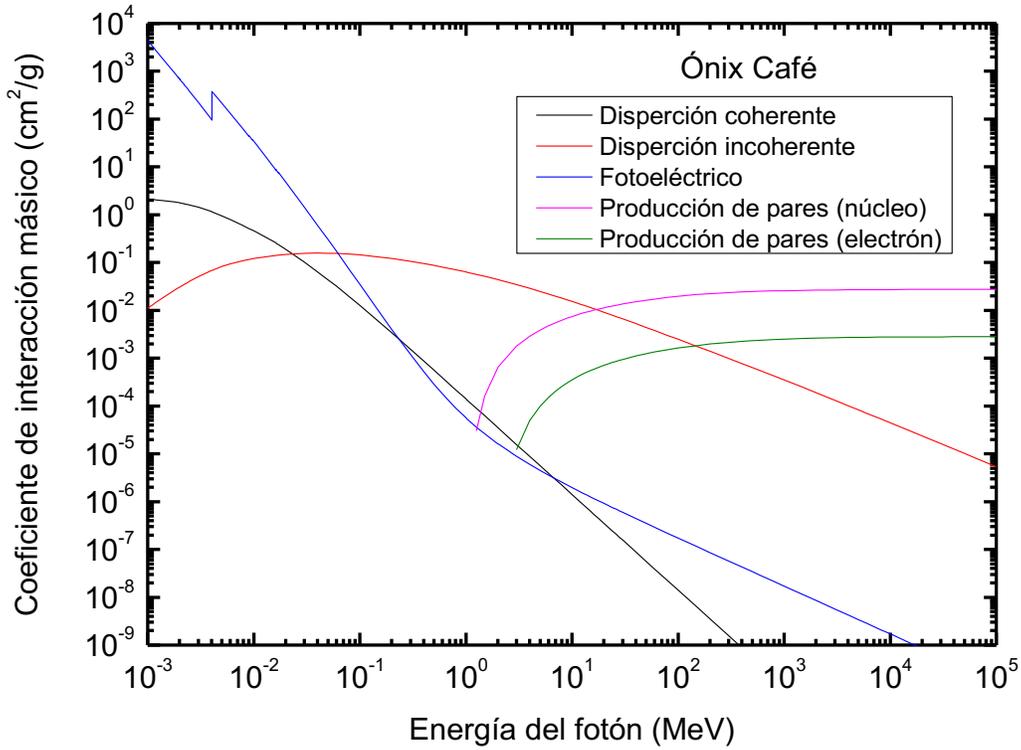


Figura 5.- Coeficientes másicos de interacción para el ónix café

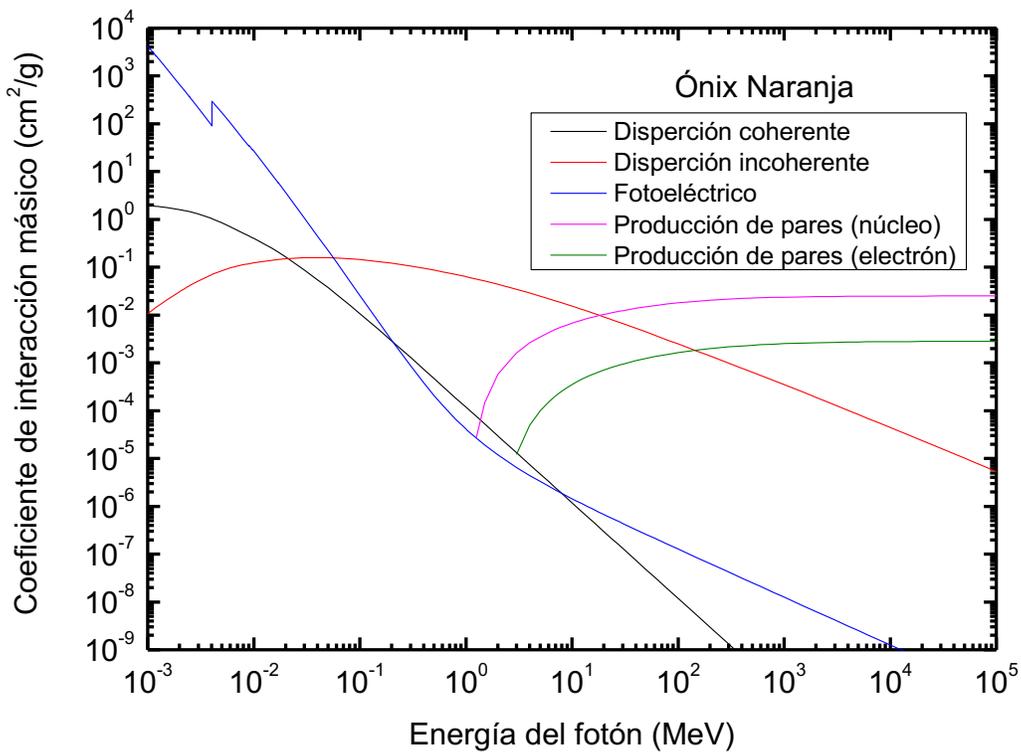


Figura 6.- Coeficientes másicos de interacción para el ónix naranja

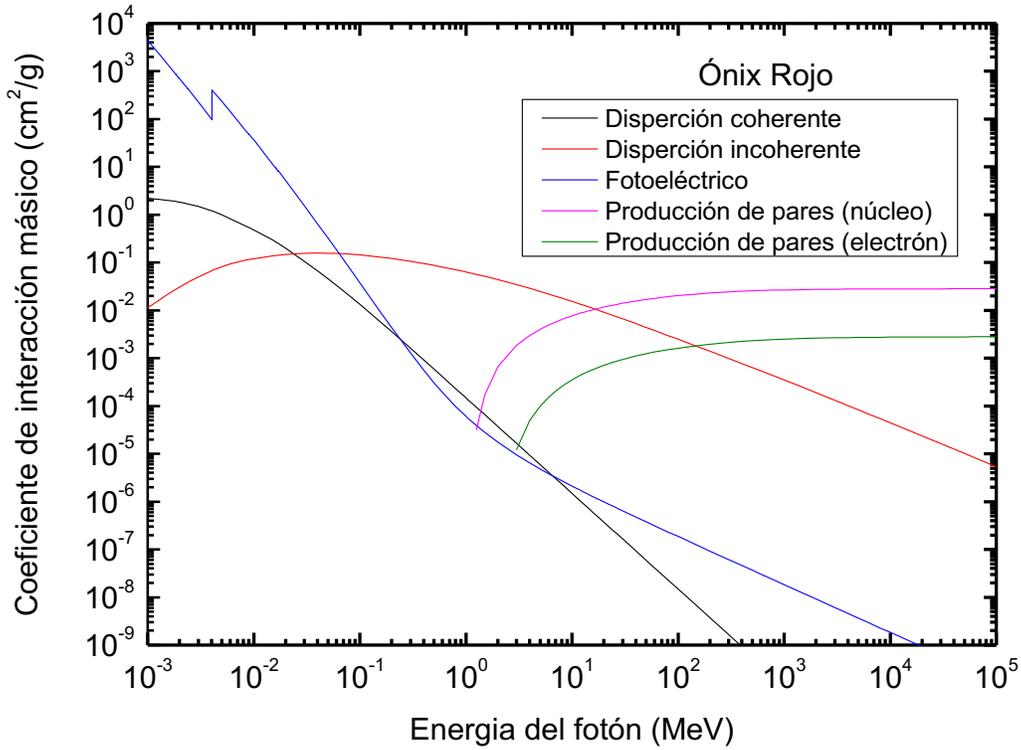


Figura 7.- Coeficientes másicos de interacción para el ónix rojo

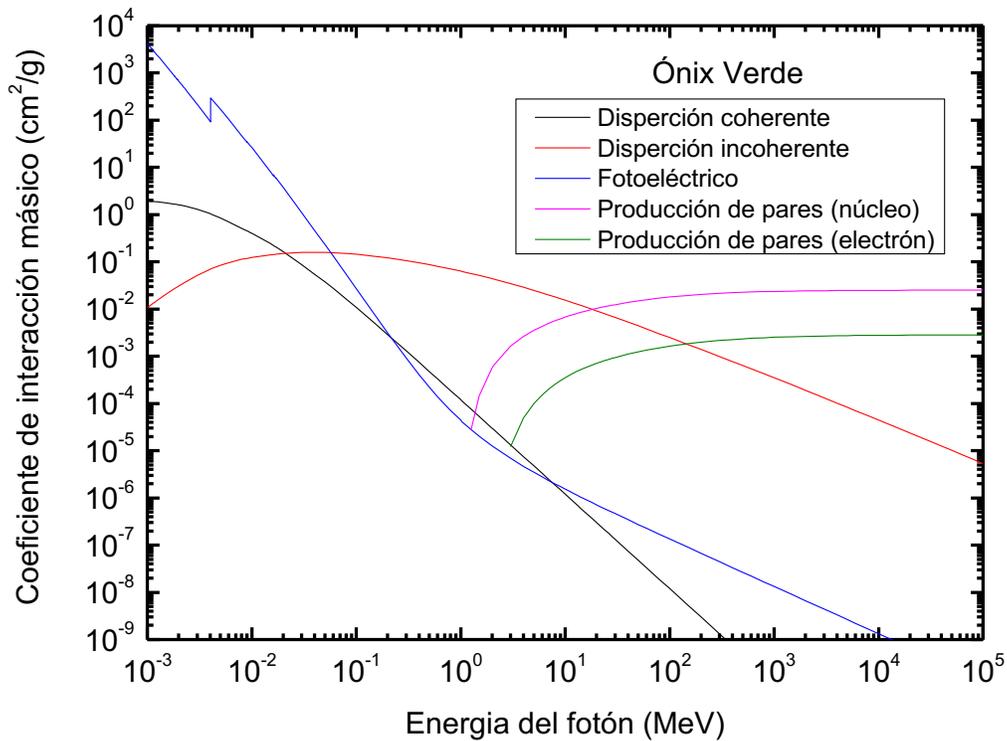


Figura 8.- Coeficientes másicos de interacción para el ónix verde

Todas las muestras presentan la resonancia en la capa K del calcio. La densidad de los seis tipos de muestras de ónix es de aproximadamente 2.6 g/cm^3 , esto es mayor a la densidad de concreto tipo Portland. Esto implica que otro de los usos potenciales del ónix es como agregado para el concreto, lo que le daría mejores capacidades de atenuación de la radiación.

En la figura 9 se muestran los Coeficientes másicos totales de interacción de las seis muestras de ónix.

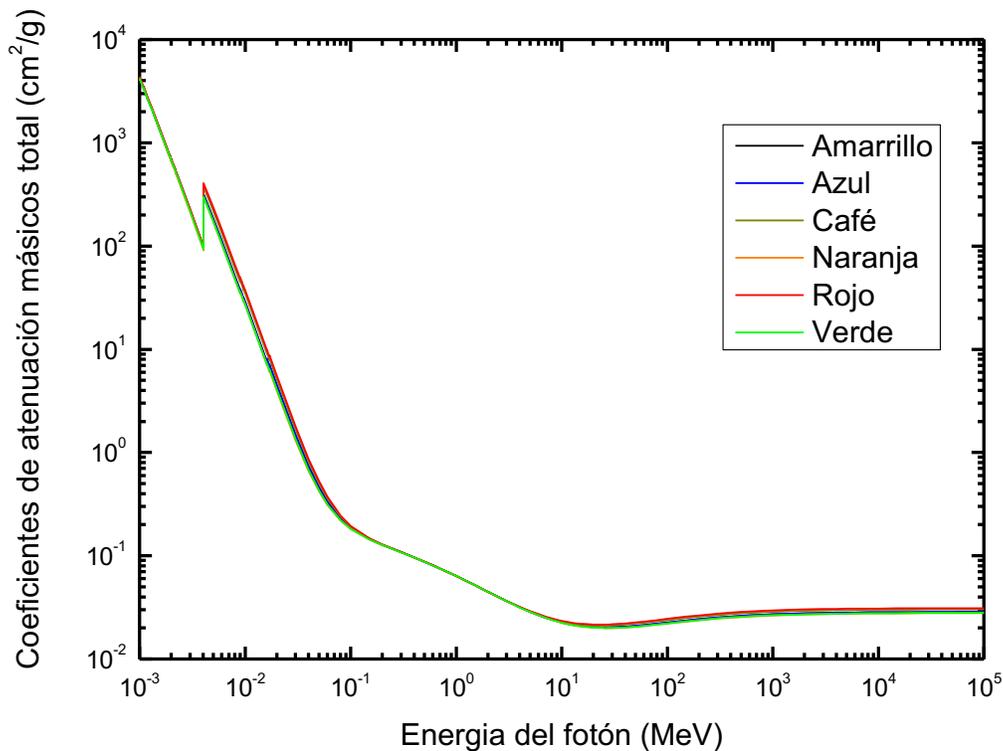


Figura 9.- Coeficientes másicos de interacción total los 6 tipos de ónix

4.- DISCUSION

Del estudio para obtener la composición elemental se puede observar que el elemento más abundante es el oxígeno cuya concentración es mayor al 50%, esto debido a que la mayoría de los otros elementos están en forma de óxidos. Después del oxígeno los elementos más

abundantes son el Calcio y el Carbono, lo que es congruente con la composición química característica del ónix la cual es CaCO_3 . Así como también se puede ver una concentración menor en las muestras de ónix de Mg, Si, S, Cu, Zn, Sr e Y. Estos últimos elementos mencionados son los que probablemente causan las variaciones de color en las muestras.

En los datos obtenidos de la espectrometría Ultravioleta Visible (UV-Vis), se obtuvo que el ónix verde es el que presenta la menor capacidad de absorción, las otras muestras tienen una capacidad de absorción que varía de aproximadamente 1.6 a 2.3. Las 6 muestras tienen una banda de absorción en el rango de 379 a 463 nm. El coeficiente de absorción α se obtuvo mediante la ecuación (1).

$$\alpha = 2.303 \frac{A}{t} \quad (1)$$

Donde A es la absorbancia y t es el grosor de la curvatura. El band gap óptico fue determinado mediante la ecuación (2) (Ghadami Jadval Ghadam and Idrees, 2013, Ramadin et al., 1996):

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (2)$$

Donde h es la constante de Planck, ν es la frecuencia del foton, E_g es el band gap óptico, A es una constante y $n=1/2$, esto dado a que el band gap es indirecto.

En la tabla 3 se presentan los resultados del band gap para cada muestra, aquí se puede observar el hecho de que los resultados son menores a los obtenidos en la literatura que oscilan entre los 6 eV para compuestos hiper puros de CaCO_3 , esta diferencia se puede explicar por el hecho de que las muestras estudiadas son minerales con diversas impurezas en ellos.

Por otro lado, se puede decir que las muestras todavía se encuentran dentro del rango de los semiconductores los cuales cuentan con un band gap menor a 5 eV (Vos et al., 2015).

Tabla 3.- Bang gap óptico para cada ónix.

Muestra	Bang gap óptico [eV]
Amarillo	3.49
Azul	3.06
Café	3.35
Naranja	3.05
Rojo	3.22
Verde	3.67

Los espectros determinados en la espectrometría Infrarroja (IR) nos indican la presencia de compuestos tales como alquinos, ácido carboxílico y alcanos. Los mayores picos están en el rango de 1174 a 1770 cm^{-1} , como también se registraron picos importantes en 419, 710, 874 y 1798 cm^{-1} (Andersen & Brecevic, 1991).

Por otro lado, los modos vibracionales en las calcitas se pueden agrupar en tres categorías: extrema de tipo traslatorio (T) y de tipo rotativo (R), y vibraciones internas (I). Las vibraciones con una frecuencia en el rango de 700-900 cm^{-1} corresponden principalmente a los modos vibraciones bending (I) de los iones de carbonato (Prencipe et al., 2004, Dumbrava et al., 2018), que son los modos principales en estas muestras.

En las figuras 3 a 8, donde se observan las gráficas de los coeficientes de interacción con la materia que muestran que todas las muestras presentan una resonancia para la interacción fotoeléctrica para fotones de aproximadamente $4.04\text{E}(-3)$ MeV que corresponde a la resonancia del Calcio (Johnson and Birky, 2012). Para fotones de energía menor a 0.06 MeV el evento más probable es la absorción fotoeléctrica, fotones de 0.06 a 18 MeV la producción de pares en el campo del núcleo atómico es el evento más probable.

Este comportamiento nos permite predecir el uso de cualquier tipo de ónix como elemento decorativo o complementario en la construcción de recintos con equipo de rayos X operando a voltajes menores a 60 kV tendrá gran capacidad como blindaje.

Finalmente en la figura 4, que es la gráfica que muestra los coeficientes másicos de atenuación total de los seis tipos de ónix, se puede ver que todas las muestras presentan la resonancia en la capa K del calcio (Johnson and Birky, 2012).

La densidad de los seis tipos de muestras de ónix es de aproximadamente 2.6 g/cm^3 , esto es mayor a la densidad de concreto tipo Portland. Esto implica que otro de los usos potenciales del ónix es como agregado para el concreto, lo que le daría mejores capacidades de atenuación de la radiación.

5.- CONCLUSIONES

Las características ópticas, químicas y nucleares de ónix mexicano, Amarillo, Azul, Café, Naranja, Rojo y Verde de la zona del semi desierto de Zacatecas, han sido determinadas. A partir de los resultados obtenidos concluimos que:

1. El oxígeno es el elemento más abundante debido a que el ónix está formado de óxidos. El elemento con menor número atómico es el C y el mayor número atómico es el Y.
2. El ónix verde es el material con la menor capacidad de absorción de ondas electromagnéticas en el rango de 190 a 110 nm, y el ónix rojo es el que presentan la mayor capacidad de absorción.
3. Todos los tipos de ónix tienen una banda de absorción de 379 a 463 nm.
4. Los Band gap ópticos encontrados para las muestras oscilan entre 3.05 a 3.67 eV, lo que es menor a lo registrado en la literatura, esto se puede atribuir a la impurezas existentes en las muestras. Sin embargo se puede decir que los ónix están dentro del rango de los semiconductores, ya que estos tienen un bang gap menor a 5 eV.

5. La estructura de ónix es hexagonal y ortorrómbica.
6. Por su composición elemental, el ónix presenta una resonancia en sus coeficientes másicos de interacción, para el caso de la absorción fotoeléctrica, que corresponde a la absorción de la capa K del Calcio.
7. Para energías menores a los 60 keV, la absorción fotoeléctrica es el evento más probable, lo que implica que su uso como blindaje en recintos con equipos de rayos menores a los 60 keV sería adecuado.

Agradecimientos

Al Ing. Luis Ernesto Olvera Rosas, docente de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, por su apoyo para la obtención de las muestras de ónix. Al Dr. Ciro Falcony Guajardo, miembro del equipo de investigación del departamento de Física del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, por haber caracterizado las muestras por los métodos de EDX e IR. Al Dr. José Juan Ortega Sigala, docente investigador de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Zacatecas, por su apoyo incondicional en mediciones de la caracterización UV-Vis, al igual en los análisis de las mismas. Al Dr. Javier Alejandro Berumen Torres, miembro del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., Unidad Querétaro, por su apoyo en los análisis de las caracterizaciones, así como su apoyo en todo el trabajo. Al C. Cristian Ramos Parga, estudiante de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, por su apoyo en la realización de las láminas delgadas y en la trituration de las muestras. Finalmente la primer, quinta y sexto autores agradecemos al CONACyT el apoyo para realizar estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Akbulut, S., Sehhatigdiri, A., Erogulu, H. & Celik, S. (2015). *A research on the radiation shielding effects of clay, silica fume and cement samples*. Radiation Physics and Chemistry, **117**, 88-92.
- Crespo, P.P.G. [Online]. *Atrás de Mineralogía Óptica*. (2016) <<http://www.ehu.es/mineralogiaoptica>>. [Reviewed on March 2018].
- Dumbrava, A., Berger, D., Matei, C., Radu, M.D. & Gheorghe, E. (2018). *Characterization and applications of a new composite material obtained by green synthesis, through deposition of zinc oxide onto calcium carbonate precipitated in green seaweeds extract*. Ceramics International, **44**, 4931-4936.
- El-Khayatt, A.M. (2017). *Calculation of photon shielding properties for some neutron shielding materials*. Nucl. Sci. Tech, **28**, 69.
- El-Khayatt, A.M., Ali, A.M., Singh, V.P. & Badiger, N.M. (2014). *Determination of mass attenuation coefficient of low Z dosimetric materials*. Radiat Eff. Detects Solids, **169**, 1038-1044.
- Ermis, E.E. & Celiktas, C. (2015). *Mass attenuation coefficient calculations of different detector crystals by means of FLUKA Monte Carlo method*. EPJ Web of Conferences, **100**, 1-3.
- Ghadami Jadval Ghadam, A. & Idrees, M. (2013). *Characterization of CaCO₃ Nanoparticles Synthesized by Reverse Microemulsion Technique in Different Concentration of Surfactant*. SID, **32**, 27-35.
- Han, I., Demir, L. & Şahin, M. (2009). *Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for some natural minerals*. Radiation Physics and Chemistry, **78**, 760-764.
- Johnson, T.E. & Birky, B.K. (2012). HEALTH PHYSICS AND RADIOLOGICAL HEALTH, Wolters Kluwer, (4th edition, 2012: 81-105).
- Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M., de Brito, J. & Asadi Shamsabadi, E. (2018). *Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder*. Journal of Cleaner Production, **170**, 42-60.
- Li, R., Gu, Y., Zhang, G., Yang, Z., Li, M. & Zhang, Z. (2017). *Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide*. Composites Science and Technology, **143**, 67-74.

- Liu, J. & Wang, D. (2017). *Influence of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete*. Powder Technology, **320**, 230-238.
- Mann, K. S., Kaur, B., Sidhu, G. S. & Kumar, A. (2013). *Investigations of some building materials for γ -rays shielding effectiveness*. Radiation Physics and Chemistry, **87**, 16-25.
- Mann, K. S., Rani, A. & Heer, M. S. (2015). *Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays*. Radiation Physics and Chemistry, **106**, 247-254.
- Mata-Chávez, M. J. (1993). *Estudio Geológico para la Explotación de Ónix del Yacimiento La Cantera, del Municipio de Francisco R. Murguía, del estado de Zacatecas.*, Tesis de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Olvera, L. & Nuñez, E. (1992). *Estudio de factibilidad para la exploración de Onix del yacimiento La Cantera en el municipio de Francisco R. Murguía del Estado de Zacatecas*. Informe técnico de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ.
- Olvera, L., Nuñez, E. & Sánchez, E. (1989). *Prospectos de Onix en la Región Norte y Noreste del Estado de Zacatecas*. Informe técnico de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ.
- Oto, B., Yildiz, N., Akdemir, F. & Kavaz, E. (2015). *Investigation of gamma radiation shielding properties of various ores*. Progress in Nuclear Energy, **85**, 391-403.
- De Brito, P. & Evangelista, L. (2017). *Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement*. Construction and Building Materials, **147**, 803-814.
- Prencipe, M., Pascale, F., Zicovich-Wilson, C. M., Saunders, V. R., Orlando, R. & Dovesi, R. (2004). *The vibration spectrum of calcite (CaCO₃): an ab initio quantum-mechanical calculation*. Physics and Chemistry of Minerals, **31**, 559-564.
- Ramadin, Y., Al-Haj Abdallah, M., Ahmad, M., Zihlif, A., Al-Ani, S. K. J. & Al-Ani, S. G. K. (1996). *Optical properties of epoxy-glass microballoons composite*. Optical Materials, **5**, 69-73.
- Rezaei-Ochbelagh, D. & Azimkhani, S. (2012). *Investigation of gamma-ray shielding properties of concrete containing different percentages of lead*. Applied Radiation and Isotopes, **70**, 2282-2286.
- Vega-Carrillo, H. R., Guzman-García, K. A., Rodríguez-Rodríguez, J. A., Juárez-Alvarado, C. A., Singh, V. P. & De León-Martínez, H. A. (2018). *Photon and neutron shielding features of quarry tuff*. Annals of Nuclear Energy, **112**, 411-417.

- Vos, M., Marmitt, G. G., Finkelstein, Y. & Moreh, R. (2015). *Determining the bang gap and mean kinetic energy of atoms from reflection electron energy loss spectra*. The Journal of Chemical Physics, **143**, 104-203.
- Zhou, X., Liu, D., Bu, H., Deng, L., Liu, H., Yuan, P., DU, P. & SONG, H. (2018). *XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review*. Solid Earth Sciences, **3**, 16-29.