

# Índice

	<b>Página</b>
1. Introducción	1
1.1 Hipótesis	3
1.2 Objetivos	3
2. Antecedentes	4
2.1 Ubicación geográfica	4
2.2 Geología regional	5
2.3 Yacimiento Santa Lucía	6
2.3 Problemática ambiental en Cuba	8
3. Marco Teórico	10
3.1. Drenaje ácido	10
3.2 Minerales de sulfuro	12
3.3 Procesos de migración y lixiviación de metales	12
3.4 Metales Pesados y Metaloides	14
3.4.1 Especiación de los metales pesados	14
3.4.2 Factores que afectan la acumulación y disponibilidad de los elementos pesados	15
3.5 Retención de elementos potencialmente tóxicos	16
3.5.1 Formación de minerales secundarios de Fe	17
3.5.2 Formación de costras de baja permeabilidad ( <i>hardpan</i> )	18
3.5.3 Formación de minerales secundarios insolubles	18
3.5.3.1 Sulfatos: barita y anglesita	19
3.5.3.2 Barita	19
3.5.3.3 Anglesita	21
3.5.4 Presencia de arcillas primarias	22
3.6 Procesos de Adsorción	22
3.6.1 Adsorción física	23
3.6.2 Adsorción química	23
3.7 Arsénico y sus efectos en la naturaleza	24
3.8 El plomo y sus efectos en la naturaleza	27

4. Metodología	33
4.1 Revisión documental y recopilación de información	34
4.2 Preparación de Muestras	34
4.3 Análisis Petrográfico y Minerográfico	35
4.4 Análisis con Microscopio electrónico de barrido	36
4.5 Análisis por Espectrómetro de infrarrojo	37
4.6 Análisis Químico puntual con Microsonda Electrónica	38
5. Resultados	40
5.1 Descripción petrográfica y minerográfica	40
5.2 Análisis cualitativo por SEM	50
5.3. Imágenes espectrales del SWIR	52
5.4 Análisis químico de la microsonda	54
5.5 Mapeo de distribución elemental (MDE)	58
6. Análisis de Resultados y Discusión	60
6.1 Caracterización mineralógica	60
6.2 La precipitación como proceso de retención de elementos potencialmente tóxicos	61
8. Conclusiones	65
Bibliografía	66

## Índice de Figuras

	<b>Página</b>
Fig. 1. Ubicación geográfica de la zona en estudio que se encuentra en la región de la Sierra de Órganos la cual se extiende al SW-NE de Cuba (Modificado de Valdés-Nodarse <i>et al.</i> , 1993).	4
Fig. 2. Mapa geológico de la región de Pinar del Río y localización del yacimiento sedimentario exhalativo Santa Lucía alojado en la formación San Cayetano compuesta principalmente por lutitas. (Modificado de Valdés-Nodarse <i>et al.</i> , 1993).	7
Fig. 3. Modelo de la estructura cristalina de la barita, esferas en azul representan el bario, esferas en amarillo simulan el azufre, esferas en gris simulan el oxígeno. (Tomado de <a href="http://www.webmineral.com">www.webmineral.com</a> ).	20
Fig. 4. Modelo de la estructura cristalina de la anglesita, esferas en verde simulan el plomo, esferas en amarillo simulan el azufre, esferas en gris simulan el oxígeno. (Tomado de <a href="http://www.webmineral.com">www.webmineral.com</a> ).	21
Fig. 5. Procesos de: A) Adsorción. Retención en la superficie de un sólido por enlaces químicos y/o físicos; B) Absorción proceso en el que los átomos, moléculas o iones en alguna fase a granel pueden entrar en un gas, líquido o sólido. C) Intercambio iónico: proceso de intercambio de iones entre una solución y un sólido.	23
Fig. 6. Muestra de mineral de arsenopirita que contiene 46% de arsénico, 34,3% de hierro y 19,7% de azufre, junto con otros minerales.	25
Fig. 7. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As-O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O a 25°C a 1 bar de presión total.	26
Fig. 8. Muestra de mineral de galena que contiene 86.6% de plomo con pequeñas cantidades de cadmio, antimonio, bismuto y cobre.	28
Fig. 9. Diagramas Eh/pH para el plomo muestran la estabilidad de compuestos y predicen el comportamiento de estos frente a un cambio en las condiciones ambientales (Modificado de Núñez, 2008).	29
Fig. 10 Ubicación de las muestras tomadas por Romero <i>et al.</i> Dentro de la mina Santa Lucía y sedimentos de la laguna a 2.5 km de esta. (Modificada de Romero <i>et al.</i> , 2009)	33
Fig. 11. Láminas delgadas utilizadas en el estudio: Y2 muestra de mena, Y5 muestra del sombrero de hierro, T2, T3, T5, T6a y T6b muestras de los terreros, S1 y S2 muestras de laguna situada a 2.5 km del yacimiento con aguas ácidas.	34
Fig. 12. Fotografía del microscopio petrográfico utilizado para realizar la caracterización mineralográfica y petrográfica. El microscopio es acoplado a una cámara digital y una computadora que incluye el software AxioVision, especializado para la obtención de las microfotografías del presente estudio.	35

- Fig. 13. Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi TM1000 utilizado en este trabajo, se encuentra acoplado a un CPU y una computadora portátil HP que tiene instalado el software de aplicación. 37
- Fig. 14. Fotografía del SWIR, analizador portátil de infrarrojo para minerales (derecha) con lámpara de infrarrojo (centro) y una computadora portátil con software de aplicación (izquierda). 38
- Fig. 15. Fotografía que muestra los componentes de la Microsonda Electrónica JEOL 8900Rc, equipada con cinco espectrómetros de longitud de onda. 39
- Fig. 16: Microfotografía de la muestra Y2. A) Barita (gris oscuro) con la pirita masiva en segregación. A su vez, la pirita con segregaciones de Esfalerita y Galena. B) Imagen tomada con luz transmitida y con nicoles cruzados donde se observa los planos de exfoliación de la barita. C) Cristal subhedral de pirita que presenta segregaciones de esfalerita en la parte superior izquierda. D) Cristal anhedral de pirita con segregación de esfalerita y barita rodeando las masas de cristal. 41
- Fig. 17. Microfotografía de la muestra Y5. A) Barita (gris oscuro) y cuarzo (traslúcido) presentes como minerales de ganga. B) y C) Goethita (gris azulado) con textura botroidal, acompañado de hematita (gris blancuzca). D) Imagen tomada con luz transmitida a nicoles cruzados donde se aprecia el color naranja parduzco de la goethita y la hematita opaca con reflexiones internas rojas. 42
- Fig. 18: Microfotografía de la muestra T2. A) Acercamiento de barita masiva donde se aprecian sobre la superficie algunos planos de fracturamiento. B) Goethita con textura intercrecida asociada a la hematita (producto de la oxidación de la goethita). C) Goethita y hematita, se distinguen por su textura, la hematita presenta textura de reabsorción (con vesículas irregulares) mientras que la goethita presenta crecimiento por bandas. D) Misma imagen de ambas fases pero con luz refleja, se aprecian bien las bandas de crecimiento de la goethita. 43
- Fig 19. Fotomicrografía de la muestra T3 A) Barita euhedral con intercrecimiento en sus fracturas de goethita. B) hematita con segregaciones de barita. C) Barita Masiva fracturada. D) y E) Anglesita con textura esferulítica presente dentro de matriz de cuarzo. F) Barita euhedral, imagen tomada con luz transmitida donde se observan los planos de crucero. 45
- Fig. 20. Fotomicrografía de la muestra T5 A) Presencia de trazas de rutilio, zircón y calcita segregadas en la matriz de cuarzo. B) Pirita euhedral con inclusiones de esfalerita. C) Goethita con una textura fluidal D) Matriz de cuarzo con inclusión de pirita euhedral, imagen tomada a luz transmitida. 46
- Fig. 21. Muestra T6a A) Y C) Matriz de Cuarzo con inclusiones de pirita, imágenes tomadas con luz reflejada. B) Matriz de Cuarzo, imagen tomada con luz transmitida donde de observa fracturamiento en dos direcciones. 47

- Fig. 22. Microfotografía de la muestra T6b. A) Pirita diseminada como segregaciones en la matriz de cuarzo, imagen tomada con luz reflejada. B) Matriz de cuarzo, imagen tomada con luz transmitida, con cristales euhedrales de pirita. C) Pirita diseminada con tamaño de microfenocristales y sin alteración. D) Cuarzo como agregado microgranoblástico intensamente intersuturado, imagen tomada con luz transmitida y nícoles cruzados, donde se aprecia la extinción no uniforme. 48
- Fig. 23. Microfotografía de la muestra S1. A) y B) Imágenes tomadas a luz reflejada y luz transmitida respectivamente, donde se observan principalmente el Cuarzo, y Barita acompañadas de óxidos (goethita) dentro de una matriz arcillosa. 49
- Fig. 24. Microfotografías de: A) Muestra Y2 Posibles cristales de pirita euhedrales a subhedrales con inclusiones de galena, los cristales están intercrecidos con barita y fracturados entre ellos. A la derecha el espectro composicional obtenido de la pirita. B) Muestra Y2 Posibles cristales anhedrales de galena, con cristales de pirita a su alrededor. A la derecha se muestra el espectro que corrobora la composición de la galena. 50
- Fig. 25. Fotomicrografías con espectros cualitativos químicos. A) Muestra Y2 Posible asociación pirita-barita con inclusiones de sulfuros como galena y esfalerita, identificados con base a microanálisis por SEM. B) Muestra T2 Sugiere una posible alteración que correspondería a la asociación mineral goethita-hematita, segregada por un cristal de barita. C) Muestra T3 posible identificación, con base en Microanálisis por SEM, de galena, barita como principal mineral, con ángulos de exfoliación rectos, acompañada de óxidos. 51
- Fig. 26. Gráfica de los espectros obtenidos por análisis de infrarrojo, que al ser comparados con estándares del equipo son identificados por su firma espectral como illita-esmectita. 53
- Fig. 27. Gráfica de los espectros obtenidos por análisis de infrarrojo, que al ser comparados con estándares del equipo son identificados por su firma espectral como illita. 53
- Fig. 28. Análisis cualitativo con microsonda mostrando la distribución del As y Pb de las muestras Y2 (A), T2 (B), Imagen A) En la fotografía se observan cristales euhedrales de pirita (cúbicos) que se encuentran cementados por una matriz de barita, estos cristales tienen en promedio tamaños menores a las 200 micras. En el mapeo se observa que el As se distribuye principalmente en las piritas, sin embargo una importante cantidad asociada a los cristales de barita algo inusual en esta fase mineral, mientras Pb se ve poco involucrado en los cristales de pirita. B) La imagen nos muestra óxidos de hierro en donde la distribución del As se ve poco involucrada dentro de estas fases minerales, mientras que el Pb se distribuye a lo largo de todos los óxidos de hierro. 58

- Fig. 29. Análisis cualitativo con microsonda que muestra la distribución del As y Pb de las muestras T3 (A), T3 (B), T2 (C). A) Imagen de la presencia de barita segregada en la hematita, en donde se observa la distribución uniforme del As en ambas fases minerales, mientras que el Pb se encuentra de forma puntual dentro de los cristales de la barita. B) Imagen de goethita en donde se observa tanto al As como al Pb uniformemente distribuidos dentro del cristal. C) Cristales euhedrales de barita y subhedrales de Anglesita, en donde la presencia del As es prácticamente nula mientras que la distribución del Pb se encuentra muy uniforme y marcada en dentro de ambas fases minerales. 59
- Fig. 30. Identificación de retención de Pb y As en partículas de beudantita(8), mediante microanálisis por MEB-EDS (Imagen tomada de Núñez, 2008). 61
- Fig. 31. Identificación de retención de Pb en partículas de plumbojarosita (2 y 3) mediante microanálisis por MEB-EDS. (Imagen tomada de Núñez, 2008). 61
- Fig. 32. Análisis cualitativo por medio de SEM que muestra la asociación de plomo con barita y que posiblemente se deba a la solución sólida del primero sobre el segundo. 62
- Fig. 33. Gráfica de solubilidad del sulfato de bario (barita) que es prácticamente estable e insoluble bajo cualquier pH. 63
- Fig. 34. Los diagramas de % adsorción indican la influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de Fe. El diagrama Eh-pH muestra la estabilidad de compuestos de hierro. 64

## Índice de Tablas

	<b>Página</b>
Tabla 1. Estándares de análisis cristaloquímicos de la barita y la celestita	20
Tabla 2. Valores de los análisis por microsonda electrónica de las muestras de la Mina Santa Lucía: Y2 (yacimiento), T2 y T3 (terreros) y S1 (sedimentos). Las muestras fueron comparadas con estándares de barita y se midió Ca, Pb, Sr, Co, Ba, As y Zn en %.	55
Tabla 3. Se muestran los valores de los análisis por microsonda electrónica de las muestras de la Mina Santa Lucía: Y2 (yacimiento). Las muestras fueron comparadas con estándares de galena y se midieron elementos como el As, Fe, S, Zn, Pb y Cu en %.	56
Tabla 4. Valores de los análisis por microsonda electrónica de las muestras de la Mina Santa Lucía: Y5, (yacimiento), T2 y T3 (terreros). Las muestras fueron comparadas con estándares de hematita y se midieron elementos como el As, Fe, S, Zn, Pb y Cu en %.	57