

## **Metales Pesados en Zonas Mineras de la Cuenca del Río Grande de San Miguel.**

Rafael C. Cartagena \*

### **RESUMEN**

En este artículo se presenta una versión de divulgación científica, de una investigación que se realizó en la región minera de la cuenca del Río Grande de San Miguel en 2006. La investigación se hizo con el objetivo de explorar la presencia de metales pesados en los sedimentos de los ríos de esa región, con la hipótesis de que la extracción de materiales de la corteza terrestre a través de las numerosas excavaciones en la zona minera, ha originado la contaminación de las aguas de esa región por metales pesados. El artículo inicia con un breve estudio de la relación del hombre con la Naturaleza, relata la muy conocida destrucción de la capa de ozono, y luego describe con alguna profundidad lo que los seres humanos han venido haciendo con la corteza terrestre.

### **INTRODUCCION**

*“...al analizar la interrelación de la naturaleza y la sociedad, el conocimiento físico desempeña un papel de gran importancia. Lo social se debe insertar en los marcos de lo físico. No se puede violar, por ejemplo, la segunda ley de la termodinámica, ni es posible ignorar las características del espacio-tiempo. Cualquier planteamiento teórico tanto en las ciencias naturales como en las sociales debe estar en concordancia con los principios fundamentales del universo, conocidos y formulados por la física, teniendo en cuenta que la vida y la sociedad son parte de la Naturaleza, del cosmos, los cuales se rigen por las leyes de la física.”*

En relación a la cita anterior, comencemos por afirmar que las dificultades que podría tener una persona con estudios universitarios o de otro nivel, para aceptar la validez de lo expresado, están relacionadas con las deficiencias de nuestro sistema educativo; estas deficiencias a su vez, radican en la marginación de que son objeto las ciencias naturales (Física, Química, Biología y Geología) en los planes de estudios de los niveles básico, medio y universitario, en casi todas las áreas del conocimiento. A diferencia de los países desarrollados, en donde el estudio de las ciencias naturales constituye el pilar de la formación científica y tecnológica que sustentan los planes de estudio en todos los niveles de enseñanza, en nuestro país las ciencias naturales no se enseñan con la suficiencia y el nivel que le corresponde, a un país “en desarrollo”. Esta aparente contradicción tiene sus orígenes en la errónea concepción, instaurada por nuestros conquistadores y luego fomentada por sus herederos, respecto a que los científicos en nuestro país tienen que ser extranjeros. La escasa formación en ciencias naturales que provee nuestro sistema educativo ha propiciado un nivel de subdesarrollo tal que cuando se habla de “la Naturaleza”, con excepción de un reducido grupo, la mayoría de las personas la entiende como algo ajeno o extraño a ellas, como la selva, las montañas, la campiña, algo que se encuentra fuera de las ciudades, o en el mejor de los casos, como algo de lo cual las personas no formamos parte-el mundo exterior. Por otra parte, cuando se habla de “la Sociedad”, aunque todavía persiste en algunas personas la idea equivocada de que “la Sociedad” es un sector privilegiado de la población que ocupa la página “social” de algunos periódicos, los acontecimientos sociales de los últimos veinte años en nuestro país, han contribuido a que a “la Sociedad” se le entienda como algo que trata de la totalidad de

individuos que viven a nuestro alrededor, es decir, como algo de lo cual todos formamos parte.

Con esta visión inicial, incompleta y un tanto difusa, intentaremos desarrollar una “explicación” de la interacción de la Sociedad con la Naturaleza, como algo que sucede entre los individuos y la Naturaleza, y se produce en dos niveles: un nivel individual, en que cada individuo de manera independiente interactúa con la Naturaleza; y un nivel colectivo, en que todos los individuos, como grupo, interactúan con la Naturaleza.

**La interacción individual con la Naturaleza.** De acuerdo con la visión planteada, se puede decir que nuestra primera interacción individual con la Naturaleza, surgiría de la primera bocanada de aire que hacemos llegar a nuestros pulmones en el instante de nuestro nacimiento; y que a partir de ese evento, nuestro cuerpo comienza a interactuar con la Naturaleza en una serie de procesos, en los cuales, además de tomar de la Naturaleza los gases, líquidos y sólidos necesarios para sobrevivir como individuos, también devolvemos a ella gases, líquidos y sólidos sobrantes, que no necesitamos. Como se puede advertir, todos estos procesos de “dar” y “recibir” suceden mediante acciones físicas tan naturales como crecer, respirar, expeler, tocar, correr, hablar, escuchar, mirar, tragar, sudar, excretar, etc., que además de satisfacer los principios de la termodinámica, están en total acuerdo con todas las leyes de la física. Este proceso físico de tomar, dar y tomar, lamentablemente no es eterno y un día llega a su fin, con nuestra última bocanada de aire al expirar en nuestro lecho de muerte. En verdad el proceso total es un poco más complejo, pues se inicia con la interacción de un óvulo y un espermatozoide de nuestros padres, y finaliza con la descomposición de nuestro cuerpo como materia orgánica, usualmente dentro de una tumba, o inusualmente dentro

del estomago de algún depredador.

Al analizar nuestra interacción individual con la Naturaleza se observa que no es posible violar las leyes físicas. Para mostrarlo valgan unos ejemplos, pero antes definamos brevemente algunas cosas. La Termodinámica es una parte de la Física que trata de las transformaciones de la energía en un sistema o conjunto de objetos macroscópicos. El estado termodinámico de un sistema lo caracterizan sus magnitudes físicas como densidad, energía, viscosidad, polarización, magnetización etc. Un sistema se encuentra en “equilibrio termodinámico” cuando su estado termodinámico no varía con el tiempo y esta invariabilidad no depende de algún proceso externo al sistema. La primera ley de la termodinámica se refiere a la conservación de la energía. La segunda ley de la termodinámica se refiere a la imposibilidad de convertir toda la energía calorífica en energía de movimiento, o sea, al grado de eficiencia de algunos procesos termodinámicos. También se refiere a la irreversibilidad de los procesos naturales.

Ahora, los ejemplos: No podemos disminuir o aumentar a voluntad nuestra edad y estatura. No podemos subir a la cima de una montaña sin tener en cuenta los cambios de presión y temperatura. La energía que gastamos en nuestros procesos vitales no puede ser mayor que la energía que tomamos de la Naturaleza. A diferencia de las plantas verdes que producen sus propios compuestos orgánicos para crecer y sobrevivir, tomando agua y nutrientes del suelo, oxígeno del aire y energía de la radiación solar, los seres humanos somos mucho menos eficientes; de ahí que para lograr nuestra mayor complejidad de orden estructural compensamos esta deficiencia consumiendo materia orgánica vegetal y animal. Así pues, todo lo que ingerimos, inhalamos o introducimos en nuestros organismos, debe caber en el espacio físico de nuestro cuerpo, y al hacerlo, debemos hacerlo cumpliendo las leyes de la física, a menos que tengamos el insano

propósito de deteriorar nuestro cuerpo, o la absurda intención de suicidarnos.

Ahora bien, según nuestra visión de la Naturaleza como “el mundo exterior” de los individuos, se debe advertir que los individuos no solo interactúan con la Naturaleza; Los individuos también interactúan entre si, como cuando voluntaria o involuntariamente comparten el agua de piscinas, ríos, lagos y mares, o bien el aire de la atmósfera, el aire acondicionado, las habitaciones, los vehículos de transporte, las calles, las ciudades y los territorios. No cabe duda que la interacción de los individuos entre si, que se desarrolla por medio del amor, el odio y la sexualidad, ha contribuido a la existencia y desaparición de muchas etnias y sociedades en el mundo. Al analizar la interacción entre los individuos, se observa que también en este caso no es posible violar las leyes físicas. Ciertamente la interacción entre individuos, en general, se enmarca en leyes dictadas por individuos investidos de alguna autoridad, y por esa razón cualquier individuo puede de alguna manera violar cualquiera de esas leyes, como las de tránsito, o las de derechos de autor. Sin embargo, ningún individuo puede violar las leyes físicas, como en el caso de querer dar o recibir un beso en la boca sin compartir microbios, o al querer ocupar simultáneamente el mismo lugar con otro individuo, sin correr el riesgo de morir o salir lastimado.

**La interacción colectiva de los individuos con la Naturaleza.** Al analizar esta interacción observaremos que resulta aun más limitada por las leyes físicas que en el caso de la interacción individual. La razón de esta mayor limitación se encuentra en el hecho de que “el mundo exterior” de cada individuo incluye inevitablemente a todos los demás individuos a su alrededor. Por muy detestable que pueda parecer, resulta aplastantemente cierto que los gases líquidos y sólidos que un individuo consume para vivir, están “contaminados” en mayor o menor grado por los gases líquidos y sólidos exhalados, expelidos, secretados, excretados y producidos de manera individual y

colectiva, por todos los demás individuos miembros de la sociedad (la humanidad), y además, por supuesto, por todas las plantas y animales de todo el planeta.

Llegados a este punto, se puede advertir que es un grave error continuar entendiendo a la Naturaleza como un mundo exterior a los seres humanos, o como algo de lo cual no formamos parte. Ya podemos corregir nuestra visión inicial para establecer que “la Naturaleza” incluye el mundo “todo”, esto es, todas las sustancias (sólidos, líquidos y gases) que existen en el mundo incluyendo las que forman parte de (y comparten) todos los seres vivos: virus, microbios, plantas, animales y seres humanos. Esto significa que, nosotros (usted, yo y toda la humanidad) y por supuesto todos los demás seres vivos de todo el mundo, somos parte de la Naturaleza. Ahora bien, dado que los seres vivos usamos la radiación del sol como fuente primaria de energía, este último aspecto, nos revela que la Naturaleza también abarca al sistema solar y todo el universo.

**Los humanos también formamos parte de la Naturaleza.** Con esta visión corregida de la Naturaleza, es fácil comprender la siguiente serie de conceptos vinculados: 1º) Lo que somos, depende de lo que comemos, bebemos y respiramos. 2º) Lo que comemos, bebemos, respiramos y excretamos viene y va, desde y hacia el

“medio ambiente”. 3º) El “medio ambiente” incluye a nuestros parientes y vecinos, que también comen

beben, respiran y excretan. 4º) El “medio ambiente” incluye a todos los seres vivos de la Naturaleza. 5º) Cuidar el “medio ambiente” no es sólo cuidar la “fauna y la flora”. Cuidar el “medio

ambiente” es cuidar nuestra vida y la de todos los seres vivos de la Naturaleza.

Ahora queda muy claro que la Sociedad y la Naturaleza no son algo aparte, y que analizar su interacción requiere del conocimiento de las leyes de la Sociedad (sociología, historia, economía, etc.), pero además requiere un mejor conocimiento de las leyes de la Naturaleza (física, química, biología, geología, etc.). Estos conocimientos resultan ser fundamentales para todos los individuos, (los padres deberían enseñar a sus hijos que no deben matar pájaros ni destruir plantas, porque los pájaros llevan de un lado a otro semillas para que haya más plantas, y las plantas producen el oxígeno que todos respiramos para vivir). Pero estos conocimientos fundamentales resultan ser de importancia estratégica para los individuos que conducen y toman las decisiones en la Sociedad. Los gobernantes no pueden propiciar ni permitir actividades que destruyen la Naturaleza, a menos que pretendan ignorar qué es la Naturaleza, o tengan el insano propósito de destruirla para acelerar la extinción de la especie humana en nuestro planeta.

### **NUESTRO PLANETA TIERRA, LA CASA DE TODOS.**

No fue hasta 1830 en que Charles Lyell, uno de los padres de la geología moderna, demostró que la Tierra era mucho más vieja de lo que se creía hasta ese momento. Años más tarde, mediciones basadas en datación por radiactividad confirmaron que la edad de la Tierra es de aproximadamente 4.600 millones de años. Nuestro planeta sin embargo, no siempre ha sido el hábitat de seres vivos; con métodos de datación por radiactividad se ha podido determinar que la vida pudo ser posible para los primeros organismos unicelulares en los océanos primitivos, hace unos 3000 millones de años. El enfriamiento gradual de la superficie fundente de nuestro joven planeta debe haber formado una frágil cáscara o corteza, de la cual erupcionaban nubes de vapor y gases incandescentes. Muchos de estos gases deben haber condensado en lluvias que

inundaron la superficie de la Tierra por milenios, dando origen a los océanos primitivos. Algunos de estos gases y otros que no escaparon del planeta debido a la fuerza gravitatoria dieron origen a nuestra primera atmósfera, la cual debido a la presencia de más y nuevos gases evolucionó hasta llegar a tener la capacidad de filtrar los letales rayos ultravioleta provenientes de nuestra estrella madre, el Sol. La disminución de la radiación ultravioleta de alta energía sobre nuestro planeta, debe haber propiciado una muy conveniente evolución combinada del aire, el agua, el suelo, las plantas y los animales. Luego de millones de años y muchos cataclismos de origen interno y externo, este sistema (la Naturaleza) debió alcanzar un peculiar estado termodinámico, donde fue posible que las especies de homínidos (seres erguidos parecidos al hombre) de hace 6 millones de años pudieran derivar en la especie humana hace tan solo unos 2 millones de años, en un hábitat extremadamente frágil que se cuela entre la superficie terrestre y la atmósfera. Ciertamente, se puede afirmar que la vida en nuestro planeta, se desarrolla en el espacio que separa dos enormes burbujas que envuelven la Tierra. Muy grandes pero también muy delgadas y muy cercanas entre si, estas enormes burbujas concéntricas son la muy famosa “capa de ozono” y la muy ignorada “corteza terrestre”.



## **LA CAPA DE OZONO**

Nuestro planeta Tierra es una esfera cuyo radio mide unos 6370 Km. Debido a la acción de la gravedad, la Tierra posee una envoltura de gases llamada atmósfera, que se extiende tan solo unos 800 Km. sobre el suelo y contiene varias capas. La mayor parte de los gases de la atmósfera se encuentra en los primeros 10 Km. sobre nuestras cabezas, en la capa llamada "troposfera". Un poco mas arriba dentro de la atmósfera a

unos 20 Km. sobre nuestras cabezas, en la capa llamada “estratosfera”, se encuentra la “capa de ozono”, una delgada capa de tan solo unos 30 Km. de espesor. El ozono es un gas tóxico que se genera por la radiación que sale de los motores eléctricos actuando sobre el oxígeno circundante; el ozono también es generado por los compuestos orgánicos volátiles como la gasolina, los solventes de pinturas y otros. A diferencia del gas oxígeno que respiramos, constituido por moléculas de dos átomos, el gas ozono es un tipo de gas oxígeno cuyas moléculas tienen tres átomos. Como se ha dicho, el ozono es tóxico, pero en la “capa de ozono” éste tiene la noble función de absorber casi el 99% de la radiación ultravioleta que llega a nuestro planeta proveniente del Sol. La radiación ultravioleta, al igual que los rayos X y los rayos gamma, tiene el notable efecto de ionizar (arrancar electrones) a los átomos de las moléculas de las células de los organismos vivos (plantas, animales y personas), produciendo mutaciones y algunos tipos de cáncer. La mayor sensibilidad biológica de los organismos vivos corresponde a la radiación de longitud de onda corta. Esta radiación es la de mayor energía y afortunadamente es la parte de la radiación del Sol que es absorbida por las moléculas de ozono, en la “capa de ozono”. Si la vida en la Tierra ha podido evolucionar hasta su estado actual debido a la protección de la “capa de ozono”, resulta muy claro que si toda la radiación ultravioleta proveniente del espacio exterior llegara hasta la superficie de la Tierra, la vida ya no sería posible. Con sus 30 Km. de espesor, la capa de ozono es, como se ha dicho, tan sólo una burbuja que envuelve a nuestro planeta y nos protege de la radiación ultravioleta que irradia el Sol; Sin embargo debido a que hay más agua que tierra firme en el hemisferio sur de nuestro planeta, la “capa de ozono” es más delgada en esa región. En efecto, en 1985, se descubrió, que en el polo sur de nuestro planeta, sobre la Antártida, la “capa de ozono”

presentaba una deficiencia del 50 % de la concentración de ozono respecto de otros sitios. Esto constituía un “agujero”, el cual, después de intensos estudios se llegó a determinar que seguiría creciendo, en la medida en que los países industrializados continuaran produciendo y vendiendo unas sustancias que contienen, cloro, flúor y carbono, llamadas Clorofluorocarbonos (CFCs). Algunos CFCs, conocidos comercialmente como Freón-11 y Freón-12, han sido usados como propelentes en aerosoles (como en los desodorantes tipo spray), y también como gas de trabajo en los refrigeradores y acondicionadores de aire. Estas sustancias tienen la propiedad de ascender en la atmósfera y entrar en la “capa de ozono” para destruir el ozono.

Cuando los CFCs se ubican dentro de la “capa de ozono”, la radiación de alta energía proveniente del sol rompe sus moléculas, y luego los átomos de cloro ya separados desbaratan las moléculas de ozono, robándoles uno de sus tres átomos, convirtiéndolas en simples moléculas de oxígeno. Las simples moléculas de oxígeno resultantes de esta mutilación no tienen capacidad para absorber la radiación ultravioleta y son inútiles para evitar que esta radiación pase a destruir la vida en la superficie de la Tierra. Se dice que en Australia, Chile y Argentina ya se observan mutaciones (cáncer) en plantas, animales y personas; también se dice que las pérdidas de ozono de los años 80 generadas sobre la Antártida, están provocando que en EEUU más de 10 millones de personas padezcan cáncer de la piel y que más de 90,000 de esos casos sean mortales. Si se produjera un agujero en la “capa de ozono” sobre el polo norte (en el Ártico), la situación sería mucho más grave que la de la Antártida, porque la radiación ultravioleta se difundiría por las regiones muy pobladas del hemisferio norte, causando daños en la salud de los habitantes de Europa, Norteamérica y Asia. Estudios realizados sobre el Ártico a mediados de los 80, revelaron que se estaba gestando un problema con el ozono, similar al de la Antártida. Esto llevó a que por iniciativa de la Organización de

las Naciones Unidas, el 16 de septiembre de 1987 varios países firmaron el “Protocolo de Montreal”, el cual regula las sustancias que agotan la “capa de ozono”, con el fin de intentar reducir escalonadamente la producción de CFCs y otras sustancias que destruyen el ozono, con una meta del 50 % para el año 2000. En 1989 la Comunidad Europea (hoy Unión Europea) propuso la prohibición total del uso de CFCs durante la década de 1990. Dadas las pruebas de que el deterioro de la “capa de ozono” se está acelerando, las enmiendas al Protocolo de Montreal de 1990 y 1992 adelantaron la suspensión de los CFCs a 1996. Se dice que los países industrializados ya no producen CFCs, pero su presencia en las fugas de acondicionadores de aire para vehículos de transporte y edificios todavía existentes en el mundo, continuará por algunos años. Se ha determinado que aún con el cumplimiento del Protocolo de Montreal, los niveles de deterioro en la “capa de ozono” bajarán a niveles “seguros” hasta alrededor del año 2050. Mientras tanto, el cáncer de origen solar continuará siendo algo normal en el mundo.

## **LA CORTEZA TERRESTRE**

La Tierra bajo nuestros pies no es tan sólida como parece. Las rocas, las cordilleras montañosas, los propios continentes, están en un estado constante de cambio y movimiento, cuya naturaleza exacta sólo ha empezado a ser comprendida en la segunda mitad del siglo pasado. Cuando se dice que La Tierra es una esfera con un radio de 6370 Km. debemos entender que si quisiéramos llegar al centro de la Tierra tendríamos que perforar un pozo de 6370 Km. de profundidad, y que si tuviéramos un “Vehículo-Taladro” que avanzara a 100 Km /h, tardaríamos casi tres días en llegar a nuestro destino.

La distancia de más de seis mil kilómetros, medida desde nuestros pies “hacia abajo” hasta el centro de la Tierra, nos puede parecer grande comparada con nuestra estatura de un poco menos de dos metros. Sin embargo, la distancia desde nuestros pies “hacia abajo” hasta donde termina la cáscara o envoltura de la Tierra sólida, nos parecerá muy pequeña. En efecto, el espesor promedio de la corteza terrestre es de tan solo unos 30 Km. y nuestro vehículo-taladro tardaría solo unos 20 minutos en atravesarla. La corteza terrestre con sus 30 Km. de espesor comparados con los 6370 Km. que mide el radio de la Tierra es, como se ha dicho, tan solo una burbuja que envuelve a la Tierra y nos protege de todo lo que se encuentra dentro de ella. Lo que se encuentra dentro de la Tierra es fácil de imaginar si recordamos lo que se observa cuando se parte un aguacate. La semilla, la pulpa y la cáscara del aguacate semejan respectivamente el núcleo, el manto y la corteza de la Tierra. Sin embargo, la corteza y la parte más externa del manto, por ser relativamente rígidas, se las considera como una sola capa llamada “litosfera”. Pero la litosfera no es de una sola pieza como la cáscara del aguacate, la litosfera está fragmentada como los ladrillos de un piso después de un terremoto. Estos fragmentos de la litosfera se superponen parcialmente como se observa con las capas de una cebolla. Estas capas de litosfera se conocen actualmente como “placas tectónicas” y en algunas partes de nuestro planeta, se separan una de otra, chocan una con otra o se meten una debajo de la otra. Como ejemplo, la corteza oceánica del océano Pacífico se mete debajo de la corteza continental de Asia y América, y este movimiento relativo de estas placas conocido como “subducción”, es la causa de terremotos y volcanes en lo que se conoce como “Anillo o Cinturón de Fuego del Pacífico”. Investigando un poco más la corteza terrestre vemos que realmente es más delgada bajo

los océanos que en tierra firme (unos 5 Km. la oceánica, unos 60 Km. la continental).

La corteza oceánica y la corteza continental constituyen los cimientos del edificio en que se alojan los seres vivos de nuestro planeta. El número de personas, animales y plantas que viven sobre la corteza continental parece disminuir desde las zonas costeras de menor altitud hasta las cimas de las montañas y picos nevados. De igual manera, el número de plantas y animales que viven en los mares que se asientan sobre la corteza oceánica, parece disminuir desde la costa en la zona nerítica de poca profundidad y abundancia de luminosidad, hasta la fría oscuridad del fondo de las zonas abisales (abismales) de los océanos. El número de plantas y animales que viven en lagos y ríos presenta también una leve relación inversa con la profundidad. Evidentemente, es grandísimo el número de seres vivos que comparten los ambientes acuático y terrestre, además de la energía solar y el aire atmosférico. Es muy fácil comprender que toda la vida acuática de los océanos depende del intercambio de gases, líquidos y sólidos que sucede tanto dentro del agua como desde fuera. Podríamos decir: “por el techo”, entre la atmósfera y la superficie de los océanos, y “por el piso”, entre la corteza oceánica y el fondo de los océanos. También es fácil comprender que toda la vida acuática de los lagos y ríos depende del intercambio de gases, líquidos y sólidos que sucede tanto dentro del agua como desde fuera. Digamos: “por el techo”, entre la atmósfera y la superficie de estos cuerpos de agua, y “por el piso”, entre la corteza terrestre y el fondo de estos cuerpos de agua. Es un poco menos fácil comprender lo que sucede con la vida terrestre, o sea la vida de las personas, animales y plantas que viven sobre los continentes e islas. La vida terrestre también depende de un intercambio de gases, líquidos y sólidos. Pero este intercambio sucede en el interior de una “interfase” que se desarrolla básicamente entre la atmósfera y la corteza terrestre continental. Ahora bien, esta “interfase” abarca unos pocos kilómetros de la atmósfera (la capa que llamamos troposfera) y tiene como techo la

“capa de ozono”. Necesitamos investigar si esta “interfase” abarca alguna parte de la corteza terrestre continental, y si además tiene algo parecido a un piso. Revisemos los hechos: los humanos, las plantas, las aves y otros animales terrestres vivimos en una especie de “océano de aire” llamado troposfera. La troposfera, como hemos dicho, es la capa inferior de la atmósfera donde el aire que respiramos es una mezcla de un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno, y un 1% de otros gases, que se encuentran mayoritariamente sobre tierra firme y los océanos. Pero los humanos, las plantas, las aves y otros animales que vivimos en tierra firme y dentro de la troposfera, no estamos solos. Nos acompañan en silencio un sinnúmero de seres vivos que habitan fuera de nuestra vista, en el “inframundo” que existe debajo de nuestros pies, en ese lugar tan olvidado y menospreciado que recibe el nombre de “suelo”. El suelo, esa delgadísima capa que alcanza como máximo solo unos pocos metros de espesor, es la capa más externa de la corteza terrestre. Podemos intentar un símil entre la piel de nuestro cuerpo con la piel de nuestro planeta: nuestra piel tiene de adentro hacia afuera una dermis y una epidermis, la piel de nuestro planeta, de igual manera, tiene una corteza y un suelo. La parte sólida del suelo está formada por partículas de varios tamaños. Las grandes partículas del suelo, como la arena y la grava, son en su mayor parte químicamente inactivas; pero las pequeñas partículas inorgánicas, componentes principales de las arcillas finas, sirven como depósitos de donde las raíces de las plantas extraen nutrientes. El tamaño y la naturaleza de estas partículas inorgánicas determinan en gran medida la capacidad de un suelo para almacenar el agua, que resulta vital para los procesos de crecimiento de las plantas. La parte orgánica del suelo está formada por restos de vegetales y de animales, junto a cantidades variables de materia orgánica

amorfa conocida como “humus”.



La parte líquida del suelo, llamada “solución del suelo”, es mayoritariamente agua con varias sustancias minerales en disolución, cantidades grandes de oxígeno y dióxido de carbono disueltos. La solución del suelo es muy compleja y tiene importancia primordial por ser el medio en que los nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas. Cuando la solución del suelo carece de los elementos requeridos para el crecimiento de las plantas, el suelo es estéril. La parte gaseosa del suelo incluye una serie de gases como el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono. El primero de estos gases es importante para el metabolismo de las plantas porque su presencia es necesaria para el crecimiento de varias bacterias y de otros seres vivos responsables de la descomposición de la materia orgánica. Los suelos bajo los mares, lagos y ríos, que se forman por sedimentación, podrían cumplir también con algunos elementos de esta caracterización. Con la inclusión del suelo en nuestros conocimientos, se puede continuar insistiendo en afirmar que la vida en nuestro planeta se desarrolla en la interfase de la atmósfera y la corteza terrestre; Sólo habrá que adicionar que esta interfase abarca unos pocos kilómetros de la atmósfera (la troposfera), y unos pocos metros de la corteza terrestre (el suelo). En esta interfase se presentan además dos ambientes interdependientes, uno terrestre y otro acuático, cada uno de ellos con una altura o una profundidad máxima de menos de 10 kilómetros. La vida en esta delgada interfase que es el hábitat de la especie humana y todas las demás especies de seres vivos de nuestro planeta, ha estado bajo amenaza natural seguramente desde sus inicios; el peligro acecha por el lado del techo, desde el espacio exterior, y por el lado del piso, desde el interior de la Tierra misma. Los sistemas de defensa natural, o sea los “escudos protectores” de esta interfase de la vida

que podemos llamar “Biosfera”, son la capa de ozono y la corteza terrestre.

Ahora bien, ya hemos verificado que un agujero en la capa de ozono es una puerta a la destrucción de la vida en nuestro planeta. Debemos investigar si en la corteza terrestre existen agujeros, y si estos agujeros constituyen, como en el caso de la capa de ozono, una puerta a la destrucción de la vida sobre nuestro planeta.

## **LOS AGUJEROS EN LA CORTEZA TERRESTRE**

La corteza terrestre tiene muchos agujeros, algunos de origen natural y otros de origen no muy natural. Los agujeros naturales son muy conocidos, se encuentran en tierra firme y en el fondo de los océanos, se les conoce con el nombre de “volcanes”. ¿Qué es un volcán? Hasta hace poco, no había porque preguntar qué es un volcán, cada quien tiene o cree tener una idea de lo que “es” un volcán. Pero en la actualidad, los avances de la investigación espacial han obligado a pensar en una definición lo suficientemente amplia para cubrir todos los tipos de vulcanismo. El vulcanismo se puede definir como la manifestación de los procesos termodinámicos internos de un planeta (o satélite), que se observan en la emisión de productos sólidos, líquidos o gaseosos, en la superficie del mismo. Esta definición permite incluir fenómenos tan diversos como las erupciones de magmas en nuestro planeta Tierra, las lavas de azufre y los manantiales de nitrógeno en “Io” y “Tritón” (satélites de Júpiter y Neptuno respectivamente), así como los flujos de “lavas de agua” en la superficie de algunos otros satélites de hielo. Por lo tanto un “volcán” es simplemente un sitio en la corteza de un planeta (o satélite), en el cual, a través de un agujero o hendidura, alguna sustancia material proveniente del interior de ese planeta (o satélite) alcanza su superficie y fluye con o sin explosividad.

En nuestro planeta, todos los volcanes en tierra firme erupcionan, en promedio, unos dos Kilómetros cúbicos de magma al año; Las grandes erupciones individuales pueden producir volúmenes mucho más grandes pero son raras. Al parecer, cada año es adicionado mucho más material a la corteza oceánica por erupciones submarinas, que el que se agrega a la corteza continental por erupciones en tierra firme, (posiblemente unos veinte Kilómetros cúbicos por año). En una erupción, puede haber flujos de lava, flujos de ceniza, flujos de escombros, lluvia ácida, etc. y la temperatura de las lavas puede sobrepasar los 1000 °C incinerando todo a su paso. La salida de enormes cantidades de gases y roca pulverizada desde el interior de la Tierra puede traer consigo el sepultamiento de cultivos, pueblos, ciudades, ríos y lagos, así como el oscurecimiento de la atmósfera. Como ejemplo se puede mencionar que los gases lanzados a la atmósfera por la erupción del Pinatubo en Filipinas en 1991, hicieron bajar la temperatura promedio del mundo 0.5 °C durante un par de años. Mount Pelée en la isla Martinica mató a 40,000 personas en pocos minutos en 1902. Las erupciones volcánicas además, generalmente generan terremotos cuya peligrosidad es de sobra conocida. Todo este vulcanismo significa una amenaza para la vida de plantas, animales y personas que viven en las cercanías de un volcán. Lamentablemente un volcán no puede ser “taponado” o “regulado”; Hasta muy recientemente la vulcanología ha podido desarrollar métodos para determinar la inminencia de una erupción, y con ello se ha podido salvar la vida de los residentes en la región de influencia de un volcán. Sin embargo, después de una erupción volcánica se debe esperar a que pase algún tiempo (años o siglos) para recuperar la flora, la fauna, el suelo, los ríos y los lagos alrededor del volcán, que como ya hemos visto, constituyen la fuente de vida de los seres humanos.

Con lo apuntado sobre el vulcanismo resulta claro que las sustancias que salen de un agujero en la corteza terrestre, vienen del interior de la Tierra a irrumpir en la Biosfera y “vienen a matar”; Estas sustancias al no pertenecer a la Biosfera, son incompatibles con la vida y por lo tanto son generadoras de enfermedades y muerte para todos los seres vivos (plantas animales y personas). Existen otros agujeros en la corteza terrestre que no tienen origen natural. Algunos de ellos son de origen animal, como las madrigueras, que no son de interés para nuestro estudio; pero existen otros agujeros que son de origen humano, y éstos sí son de interés para nuestro estudio, porque aunque han sido hechos por el hombre, tienen efectos similares o más letales que los agujeros de origen natural.

### **Los pozos Geotérmicos.**

Cuando se perfora un agujero en la corteza terrestre, se encuentra que la temperatura se incrementa conforme aumenta la profundidad, en algo así como 25 °C por kilómetro. A esto se le conoce como el “gradiente geotérmico”. Esta propiedad física hace que el agua subterránea sea mas caliente que la de los ríos y lagos, y se puede utilizar para convertir energía geotérmica en energía eléctrica. En las regiones volcánicas el agua subterránea es calentada adicionalmente por el calor proveniente de las cámaras magmáticas , o sea las grandes bolsas de roca fundida que forma la lava que sale del cráter de un volcán; Los pozos geotérmicos se perforan para permitir que el agua subterránea sobrecalentada y sometida a gran presión en la profundidad del subsuelo salga a la superficie como vapor de agua para mover turbinas, que, como en el caso de las centrales hidroeléctricas, puedan convertir la energía de rotación en energía eléctrica mediante generadores. Aunque la energía geotérmica es limpia en cuanto no consume combustibles, los productos de desperdicio de las aguas o vapores que utiliza, pueden

tener efectos nocivos debido al contenido de gases como el sulfuro de hidrogeno y los minerales disueltos que traen las aguas o vapores provenientes del subsuelo. Así pues, un pozo geotérmico es un agujero en la corteza terrestre del cual salen sustancias que estuvieron en equilibrio termodinámico en el subsuelo, en un ambiente donde no existe la vida. Estas sustancias al salir a la superficie, son incompatibles con el ambiente de la vida y naturalmente son nocivas para los seres vivos. En los países que tienen recursos geotérmicos, como el nuestro, la explotación de la energía geotérmica se inició tirando al ambiente el agua residual después de haber condensado el vapor en las turbinas. Después de muchos años de enfermar o matar plantas, animales y personas, la industria geotérmica mundial ha tratado de mitigar esta desgracia perforando pozos de “reinyección” para devolver las aguas residuales al subsuelo.

### **Los pozos petroleros.**

Los primeros pozos petroleros se perforaron en Alemania entre 1857 y 1859. En 1855 el químico estadounidense Benjamín Silliman había publicado un informe que indicaba una amplia gama de productos útiles que podían obtenerse de la destilación del petróleo. El petróleo es un “licuado” de cadáveres y basura orgánica que se formó bajo la superficie terrestre debido a la descomposición de los restos de animales marinos y de organismos terrestres arrastrados por los ríos hacia el mar, que fueron sepultados por avalanchas y sedimentos en cuencas marinas. Estos licuados, ricos en materiales orgánicos, se convirtieron en rocas generadoras de petróleo como resultado de un proceso que comenzó hace muchos millones de años y continúa hasta el presente. Para localizar petróleo en el subsuelo, se debe buscar una cuenca sedimentaria con minerales ricos en materia orgánica, que hayan tenido suficiente tiempo para convertirse en petróleo (desde unas decenas de millones de años hasta unos cien millones de años).

Así pues, el petróleo se forma en el subsuelo, en un ambiente donde no existe la vida. Un pozo petrolero, entonces, es un agujero en la corteza terrestre, a través del cual se extrae una sustancia que por millones de años ha estado en el subsuelo a una presión y a una temperatura propias del equilibrio termodinámico con su ambiente natural, el subsuelo; pero la extracción del petróleo del subsuelo, y su colocación en la superficie del suelo, dentro de la Biosfera, hace que este petróleo que es una sustancia incompatible con el ambiente de la vida se constituya en un veneno. Siendo el petróleo una sustancia incompatible con la vida, no puede menos que ser un veneno para los seres vivos; Sin embargo, el petróleo se extrae de miles de pozos en el mundo y genera el combustible de casi todos los medios de transporte actuales. Es difícil negar la ventaja y la comodidad que supone el uso de vehículos, barcos y aviones, en relación a los caballos y las carretas; también es difícil negar el absurdo de que solo el 10% del petróleo se usa para uso humano y que el 90% restante se quema en máquinas que lanzan sus productos de combustión a la atmósfera. Algunos de estos productos pasan a formar parte del aire que respiramos los seres vivos, los que sobran pasan a formar parte de los “gases invernadero” que calientan la atmósfera. En muchas ocasiones el petróleo no alcanza a llegar a las máquinas y se derrama en los barcos que lo transportan. El mayor derrame de este tipo totalizó unos dos millones de barriles, y se debió al choque de dos barcos petroleros, cerca de Trinidad y Tobago en 1979. El petróleo también se derrama en los tubos de perforación de las plataformas petroleras marinas; Como ejemplo recordemos lo ocurrido en el Golfo de México cuando un reventón (“*blowout*”) del pozo “IXTOC I” de PEMEX provocó el derrame de 3.3 millones de barriles de crudo, que duró desde el 3 de junio de 1979 hasta el 24 de marzo de 1980. Es difícil no imaginar los efectos que estos derrames produjeron en los

seres vivos que habitaban el mar Caribe y el golfo de México en esa época.

## Los pozos hídricos

El agua que beben los millones de habitantes de las grandes y pequeñas ciudades en el mundo es considerada como una sustancia natural, porque proviene de ríos lagos y pozos. Cualquier persona citadina tiene la certeza de que el agua que bebe es “pura”, ya sea porque es “envasada” o porque supone que ha sido “tratada” por las instituciones distribuidoras de agua potable, privadas o estatales. Nadie se atreve a imaginar que el agua que bebe pueda tener algún origen “artificial” y mucho menos que tenga algún efecto nocivo. Esto se debe a que actualmente casi nadie tiene conciencia de que en el pasado los seres humanos bebían agua de ríos y manantiales naturales; y que la destrucción de los bosques por la despiadada tala de árboles, eliminó el agua de los manantiales, de la misma manera en que la conexión de alcantarillados a los ríos para vertidos y aguas negras provenientes de las ciudades, eliminó la potabilidad del agua de esos ríos. Con estos “avances del desarrollo” los seres humanos dejaron de beber agua natural y no tuvieron mas alternativa que acostumbrarse a beber agua “reciclada” o agua “subterránea” extraída de pozos perforados en el subsuelo. En nuestro país, habría que agregar, que las miles de personas que habitan en los flancos de los volcanes, y que no cuentan con servicio de agua potable, no tienen más alternativa que acostumbrarse a beber agua llovida acumulada en tanques durante el invierno. Pero nos interesa investigar un poco más lo que sucede con el agua de los pozos. Los pozos excavados poco profundos llamados “artesanales”, difícilmente escapan a la contaminación biológica producida por la infiltración de microbios y bacterias provenientes del suelo. El consumo de agua extraída de estos pozos suele producir enfermedades, en general de tipo gastrointestinal, constituyendo una amenaza para la salud de las personas. Los pozos perforados más profundos llamados “industriales”

suelen estar libres de contaminantes biológicos, pero no pueden evitar contener algunos minerales que existen en el subsuelo. Pasemos a investigar porqué sucede esto. Un pozo de agua subterránea, no es más que un agujero en la corteza terrestre, que se perfora en el suelo de tal modo que a cierta profundidad se alcanza una capa de material que contiene agua. Esta agua naturalmente no es “pura”, porque contiene minerales en solución provenientes de las rocas de esa capa, debido a que se encuentra en equilibrio termodinámico con su ambiente natural, el subsuelo; Por lo tanto la extracción de esta agua del subsuelo, propia del ambiente donde no existe vida, y su colocación en el ambiente de la vida, hace que esta agua con minerales en solución, resulte ser extraña y hasta nociva para los seres vivos, dependiendo del tipo de minerales que existan en el subsuelo de la región donde se ha perforado el pozo. Muchos agricultores en el mundo se han decepcionado al constatar que un sistema de riego por aspersión mejora las cosechas al principio, pero luego con el paso del tiempo estas van perdiendo su calidad; Esto parece absurdo, hasta que el análisis de muestras del suelo demuestra que todo se debe al incremento de sales minerales acumuladas en el suelo, que provienen justamente del subsuelo, disueltas en el agua. Debemos aceptar que la diferencia entre el agua de un manantial natural y la de un pozo hecho por el hombre, es que el agua de manantial ha tenido suficiente espacio y tiempo para ir cambiando su estado termodinámico en su recorrido desde el interior de la corteza terrestre hasta la superficie del suelo. Esto puede parecer impresionante o hasta increíble. Basta recordar lo que se dijo respecto a los conocimientos en ciencias naturales, y que se hizo notar al inicio de este artículo; Los habitantes de las regiones donde hay volcanes, como en nuestro país, deberían saber, como parte de su formación académica escolar, que los sistemas hidrotermales de los volcanes, o sea, los sitios y procesos de generación de fluidos en la



zona de influencia de un volcán, son los proveedores de los mantos acuíferos en esas zonas; También deberían saber que la variación química de las aguas de los pozos artesanales e industriales en esas zonas, es algo muy normal debido a la transferencia de gases de las cámaras magmáticas de los volcanes hacia los mantos acuíferos. Es justamente por ello, que esta variación química se usa como un parámetro de investigación y monitoreo volcánico en esas regiones. El Instituto de Vulcanología de la Universidad de El Salvador lo hace en nuestro país. Con lo dicho sobre los pozos hídricos, haremos mucho bien en suponer que las instituciones que proveen agua potable en todo el mundo (y en nuestro país), deben tener sistemas de tratamiento de las aguas de los pozos industriales para consumo humano, envasadas o municipales, cuyo propósito es eliminar los minerales nocivos además de los contaminantes biológicos. Sin embargo, debemos aceptar que es bastante conocida la relación de los contaminantes biológicos del agua de los pozos con las excretas de origen humano y animal, pero no es muy conocido lo referente a los minerales nocivos. Debemos profundizar nuestro conocimiento sobre los minerales nocivos. Una sustancia tóxica es toda sustancia química que puede lesionar o matar a una persona, un animal o una planta, es un veneno. Resulta interesante observar que en los libros de Toxicología la clasificación de sustancias tóxicas comienza con los “metales pesados”. Veamos brevemente que son los “metales pesados”.

De los 106 elementos conocidos por el hombre, 84 de ellos son metales. Los metales más conocidos son el oro, la plata, el hierro, el aluminio, el cobre, el plomo, etc. Como se puede notar, la gran mayoría de los metales son poco conocidos; pero todos ellos, incluyendo los poco conocidos, no se encuentran tirados sobre el suelo, los metales se encuentran en depósitos o yacimientos dentro de la corteza terrestre, o sea fuera y

debajo de la Biosfera, y por esa simple razón son tóxicos. Ahora bien, no todos los metales son abundantes, algunos de ellos son muy escasos en la corteza terrestre, y por tal razón los más nocivos para la salud son sólo unos pocos. De entre los más nocivos destacan el plomo, el mercurio, el berilio, el bario, el cadmio, el cobre, el manganeso, el níquel, el estaño, el vanadio y el zinc, y a estos se les conoce como “metales pesados”.

Si tuviésemos alguna preocupación por los metales pesados, tendríamos que comenzar por saber que éstos solo pueden aparecer en forma natural en una erupción volcánica, o en fuentes de aguas termales. Sin embargo, estos metales también se presentan de manera no natural en los desechos de las grandes ciudades y de la industria, particularmente de la industria pesada en los países desarrollados.

### **Los pozos mineros.**

Una de las “industrias” más antiguas de la humanidad es la minería. Desde sus inicios el hombre ha venido excavando el suelo en la búsqueda de materiales para la fabricación de armas y herramientas. Seguramente al principio de la humanidad la minería solo consistía en recoger o desenterrar obsidiana u otras rocas. A medida que se acababan los yacimientos de la superficie, las excavaciones se hacían más profundas, y de la misma manera que los manantiales dieron paso a los pozos de agua en los tiempos modernos, la minería de superficie dio paso a la minería subterránea desde la antigüedad. Se dice que la mina subterránea más antigua del mundo, es una mina de almagre (mineral de hierro) en Suazilandia, África meridional, que fue excavada 40.000 años antes de nuestra era. Resulta un tanto bizarro que la horadación de la corteza terrestre -uno de los escudos protectores de la vida en nuestro planeta-, continúe siendo una actividad necesaria para el “desarrollo” de la especie humana. Veamos porqué.

En algunos países la industria minera está particularmente vinculada a la contaminación del “ambiente”, en razón de los métodos empleados para el procesamiento de las menas, y por los productos de desecho de esta actividad. En Estados Unidos, por ejemplo, los mineros han utilizado mercurio para extraer el oro; A partir de 1852 la tecnología de la minería hidráulica fue mejorada usando cañones de agua para romper y diluir las menas, pero la lechada resultante era conducida a través de túneles de drenaje donde las partículas de oro se mezclaban con mercurio para formar una amalgama que luego se recogía para recuperar el oro. Hoy se sabe que el desperdicio de mercurio en este proceso fue de hasta un 30 por ciento por temporada, lo cual dio como resultado sedimentos (lodos) altamente contaminados en los ríos de los alrededores de las minas. Según los estudios del United States Geological Survey (USGS) y la Environmental Protection Agency (EPA), las elevadas concentraciones de mercurio en las aguas y los sedimentos en las zonas mineras de Estados Unidos en la actualidad, indican que aún permanecen cientos de miles de libras de mercurio en cada uno de los sitios afectados por la industria minera del oro. Solo en California existen al menos una decena de ríos y lagos vedados para la pesca por esta causa. Se dice que con el propósito de “eliminar” la contaminación, las grandes compañías mineras han venido sustituyendo el mercurio por sales de cianuro para recuperar el oro y la plata de las menas. El cianuro es reconocido como un veneno en todo el mundo, pero un derrame proveniente de los tanques de captación de las menas tratadas con cianuro en las minas, es un suceso poco probable en los países de origen de las grandes compañías mineras de oro (Canadá, USA, etc.). Sin embargo, la situación es trágicamente diferente en los países de alta sismicidad como los que se ubican en el cinturón de fuego, alrededor del océano pacífico. (El Salvador por ejemplo).

Con estos datos sobre la industria minera y lo que hemos visto sobre la corteza terrestre, podemos observar que existen dos peligros relacionados con este tipo de industria. El peligro más evidente de la industria minera -en particular para la minería de oro-, es el hecho de que los vertidos de las minas y las aguas residuales siempre han ido a parar a las quebradas, las cuales en época de lluvia conducen la escorrentía hacia los ríos y estos se contaminan con los productos químicos usados en el proceso de separación del oro de las menas. Este peligro está asociado con la destrucción de plantas y árboles (desertificación), extinción de especies animales, desaparición de manantiales, disminución del nivel de los acuíferos, contaminación de ríos y lagos, generación de enfermedades y emigración forzada de grupos humanos de las regiones mineras. Este peligro viene siendo denunciado cada vez más intensamente por las personas que aman la vida en todos los países amenazados. Pero también es negado como un peligro, y más bien es presentado como todo lo contrario (minería “verde”) por las compañías mineras y los defensores de sus intereses.

El otro peligro de la industria minera, menos evidente pero mucho más grave por ser inevitable para todo tipo de minería, se presenta en el hecho de que toda excavación minera es nada menos que un agujero en la corteza terrestre, a través del cual se extraen materiales que por millones de años han estado en el subsuelo. Estos materiales han estado en equilibrio termodinámico con su ambiente natural, el subsuelo, o sea que son propios de un ambiente donde no existe la vida; por lo tanto, la extracción de estos materiales, y su colocación en la superficie del suelo en el ambiente de la vida, hace que estos materiales incompatibles con la vida, sean extraños y nocivos para los seres vivos,

o sea que se constituyen en sustancias tóxicas. Estas sustancias tóxicas, gaseosas, líquidas y sólidas, salen a contaminar la atmósfera, se suman a los vertidos de aguas

residuales que llegan a los ríos; con el tiempo, estas sustancias tóxicas se infiltran hacia

los mantos acuíferos causando su contaminación. Este peligro, aunado con cualquier grado de vulnerabilidad de una región en particular, hace que todas las especies vivas y su hábitat corran el riesgo de ser aniquilados. La minería “verde” no existe.

En nuestro país, la preocupación por el mercurio y otros metales pesados, podría disiparse al recordar que éstos metales solo aparecen en una erupción volcánica, o se presentan en los desechos químicos derivados de la actividad industrial. Podemos sentirnos aun más tranquilos al observar que actualmente no tenemos volcanes en erupción, y además porque no somos un país altamente industrializado. Por lo tanto, hasta podríamos creer que en nuestro país el mercurio y otros metales pesados deberían ser inexistentes.

Pero no todo es tan simple. Cuando se investiga (en la escuela, por supuesto) sobre el origen de algunos de nuestros recursos naturales como el cemento, la energía geotérmica y el oro, casi todos los salvadoreños logran asociar el cemento con Metapán, y algunos llegan a asociar la geotermia con Ahuachapán o con Berlín; pero muy pocos llegan a asociar el oro con Santa Rosa de Lima. En las zonas mineras de la zona oriental los habitantes manifiestan que en las minas se ha venido usando el “azogue” (mercurio) para extraer el oro, desde hace más de 100 años, y los mineros artesanales continúan con esa práctica, hoy en día.

## **LA MINERIA DE ORO EN EL SALVADOR**

La extracción de oro en nuestro país formó parte de la explotación de las riquezas de Hispanoamérica desde la conquista, continuó en tiempos de la independencia, y se mantuvo con algunas interrupciones hasta la época de la guerra de los 80. La minería de

oro siempre ha estado centralizada en la zona oriental, donde abarca un área de más de 300

<sup>2</sup>  
**Km**, que comprende los departamentos de La Unión, San Miguel y Morazán. Los registros históricos parecen marcar el año de 1780, como el inicio de labores de las minas Los Encuentros y Tabanco. La “era moderna” de la minería de oro comenzó con las minas de San Sebastián y Divisadero, al ser adquiridas por la Compañía Butters Salvador Mines Ltd., entre 1900 y 1905. La época “dorada” sin embargo ocurrió entre los años 1907 y 1917, y luego de ciertos altibajos se llega al año de 1969, cuando reanuda sus actividades la mina San Cristóbal (antes Montecristo) y posteriormente la mina San Sebastián. En la actualidad los mineros artesanales de oro en la zona de El Divisadero, Jocoro y Santa Rosa de Lima cubren con holgura la demanda de oro en el mercado de la región oriental de El Salvador. Ahora bien, como las técnicas de extracción del oro en las minas salvadoreñas no han sido muy diferentes de las usadas en Norteamérica, el mercurio es uno de los metales pesados que podrían encontrarse en la cuenca del río Grande de San Miguel. Resulta interesante investigar si además del mercurio podrían encontrarse otros metales pesados en nuestra región oriental.

Si se recuerda que nuestro país se encuentra en la frontera de dos placas tectónicas, en la zona donde convergen la Placa de Cocos y la Placa del Caribe, y que el proceso de subducción entre estas dos placas determina que nuestro territorio sea de origen volcánico en más del 90%, se comprenderá que la mayor parte de nuestros recursos naturales estén asociados con el vulcanismo. Las centrales geotérmicas son un ejemplo de ello. De ahí que es muy fácil entender que los depósitos de metales preciosos (oro y plata) en el norte de Nicaragua, sur de Honduras nororiental de El Salvador, y sur de Guatemala están asociados a los procesos metamórficos que han ocurrido en la cadena

de intrusivos (cuerpos de magma) que no llegaron a hacer erupción pero ascendieron a la corteza terrestre en estos sitios, hace más de cincuenta millones de años, cuando se iniciaban los procesos geológicos que dieron como resultado la construcción del istmo centroamericano.

Por “proceso metamórfico” se entiende la transformación de una roca, que como resultado de altas temperaturas, altas presiones o ambas causas, adquiere una nueva textura y una nueva composición mineralógica. Sin embargo cuando las rocas se forman completamente debido a la precipitación de minerales derivados de soluciones hidrotermales, no pueden ser llamadas “metamórficas”. De ahí que se usa el término “hidrotermales” para las rocas formadas por precipitación de soluciones minerales en agua caliente. Los fluidos hidrotermales son, la fuente más importante de depósitos de menas metálicas; Los átomos de metales como el cobre y el oro, los cuales no encajan dentro de los cristales de minerales creciendo en un cuerpo de magma que se enfría, pueden ser concentrados en el magma sobrante rico en agua. Así, una solución caliente rica en metales y sílice puede moverse hacia la roca circundante para crear depósitos de menas llamadas venas hidrotermales. Las venas hidrotermales son cuerpos de menas formadas a lo largo de juntas y fallas en el subsuelo. Los fluidos pueden precipitar menas dentro de las cavidades a lo largo de las fracturas, y pueden además reemplazar la roca de la pared de la fractura con menas. Las venas hidrotermales forman la mayor parte de los grandes depósitos del mundo para plomo, zinc, plata, oro, tungsteno, litio, mercurio y en alguna medida cobre. Las menas de estos metales se encuentran en venas de cuarzo. Las venas que contienen suficiente metal extraíble son tan poco comunes, que más bien se le podría considerar como un defecto en la naturaleza.



Con estos breves conceptos se podrá comprender porqué el oro es un metal que aparece en nuestro país, justamente como un producto de la evolución de los sistemas hidrotermales asociados al vulcanismo más antiguo que se ubica en la zona nororiental.

Sin embargo, cuando el oro se encuentra en venas hidrotermales, como en las zonas del vulcanismo más antiguo de nuestro país, el oro comparte su territorio con minerales que contienen azufre y metales. Estos minerales se conocen como “sulfuros”. La Tabla 1 muestra un listado de sulfuros con su nombre mineralógico y el metal que contienen. .

**TABLA 1**

<b>MINERAL</b>	<b>METAL</b>	<b>AMBIENTE</b>	<b>EN ASOCIACION CON</b>
Greenockita CdS	cadmio	alteración de Esfalerita en contacto acuífero	Blenda
Blenda: ZnS (Esfalerita)	zinc	venas hidrotermales	Galena, Argentita Calcopirita
Argentita: Ag <sub>2</sub> S ( Argirita)	plata	venas hidrotermales	Galena
Galena: PbS	plomo	venas hidrotermales	Blenda y Argentita
Calcopirita: CuFeS <sub>2</sub>	cobre	venas hidrotermales, rocas efusivas o metamórficas	Pirrotina, Blenda , Pirita
Pirrotina: Fe <sub>11</sub> S <sub>12</sub>	hierro	segregación magmática venas hidrotermales	Minerales de cobalto platino y níquel
Pirita: FeS <sub>2</sub>	hierro	venas hidrotermales	Oro, Calcopirita, Galena, Blenda,
Oropimente: As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	arsénico	subvolcanico	Cinabrio
Rejalgar: AsS	arsénico	subvolcanico hidrotermal	Oropimente, plata
Cinabrio: HgS	mercurio	vetas hidrotermales	Rocas volcánicas Fuentes hidrotermales
Glaucodor: (Co,Fe)AsS	cobalto arsénico	venas hidrotermales	Pirita, Calcopirita, Galena

La característica mas notable de los sulfuros es que siempre se encuentran en grupo, o sea que cuando aparece uno, éste aparece asociado con otro, y así sucesivamente Así por ejemplo en la tabla vemos que la “Pirita” (sulfuro de hierro) que se encuentra asociada con el Oro, también se encuentra asociada con la “Galena” (sulfuro de plomo y con la “Blenda” (sulfuro de zinc), pero esta última se encuentra asociada con la “Greenockita” (sulfuro de cadmio), etc. Así pues, no cabe duda que donde se encuentre el oro se encontraran los sulfuros, donde estén los sulfuros estarán los metales, y entre éstos, naturalmente, estarán los “metales pesados”.

El siguiente paso es investigar si en nuestras viejas zonas mineras de oro, se encuentran algunos metales pesados

## LA ZONA DE ESTUDIO

Se identificó la zona de estudio en la región media alta de la cuenca del Río Grande de San Miguel, donde se ubican los distritos mineros de oro y plata, como se indica con

puntos en la Fig. 1

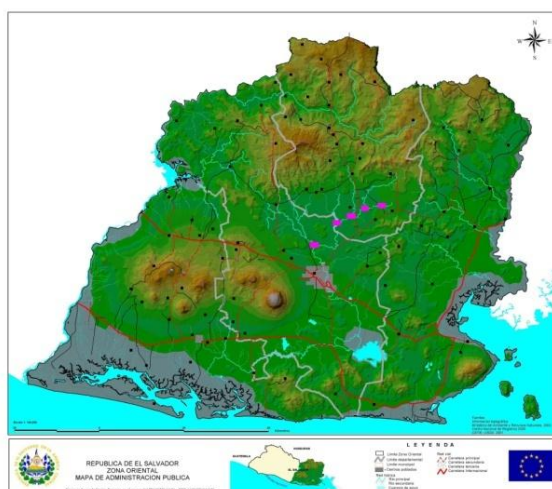


Fig.1

Se tomaron muestras de agua y sedimento en 24 sitios, ubicados en las entradas y salidas de los encuentros de los ríos: a) La majada y Seco en las cercanías de El Divisadero; b) Seco y San Francisco a unos 5 Km. aguas abajo del puente sobre el río Seco en la carretera que va de la ruta militar hacia san Francisco Gotera; c) Corozal y Guayabal a unos 15 Km. desde la entrada al caserío El Chorizo sobre la calle a San Francisco Gotera, y d) Cañas y Grande a unos 20 Km. al noreste de la ciudad de San Miguel, como se indica en la Fig. 2.

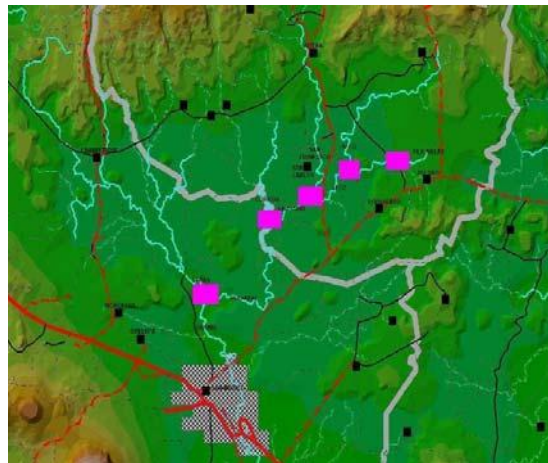


Fig.2

El análisis de las muestras de agua, se realizó usando un espectrómetro de masas de absorción atómica en el Instituto del Agua de la UES en la Facultad. Multidisciplinaria de Occidente. El análisis se limitó a la detección de mercurio disuelto en el agua cuya concentración en microgramos por litro ( $\mu\text{g/l}$ ), se muestra en la Tabla.2

Lugar	Muestra	ph	T (°C)	k (µs)	Hg (µg/L)
Río Seco h=172 msnm N 13°37'33" W 88°04'22"	1	7.9	24.4	418	1.31
	2	7.9	24.4	415	nd
Río La Majada h=172 msnm N 13°37'32" W 88°04'20"	3	8.8	27.9	580	nd
	4	8.7	27.9	579	nd
Río Seco h=169 msnm N 13°37'31" W 88°04'25"	5	8.8	32.4	395	nd
	6	8.8	32.4	404	nd
Río Sn Fco h=159 msnm N 13°36'32" W 88°06'17"	7	8.6	30.8	402	0
	8	8.6	30.7	402	nd
Río Seco (e) h=158 msnm N 13°36'31" W 88°06'09"	9	7.9	28.4	358	nd
	10	7.8	28.7	358	nd
Río Seco (s) h=156 msnm N 13°36'27" W 88°06'14"	11	8.0	30.1	478	nd
	12	8.0	29.8	475	nd
Río Corozal h=131 msnm N 13°35'35" W 88°08'01"	13	8.6	32.2	356	nd
	14	8.6	32.3	355	nd
Río Seco h=131 msnm N 13°35'25" W 88°07'55"	15	8.5	30.4	340	0.16
	16	8.5	30.2	344	nd
Río Guayabal h=131 msnm N 13°35'24" W 88°08'10"	17	7.9	30.4	345	nd
	18	8.0	30.2	347	nd
Río Cañas h=108 msnm N 13°32'16" W 88°11'20"	19	9.1	32.6	246	nd
	20	9.1	32.4	246	nd
Río Guayabal h=108 msnm N 13°32'16" W 88°11'17"	21	8.2	30.2	258	nd
	22	8.2	30	261	nd
Río Grande h=105 msnm N 13°32'09" W 88°11'17"	23	8.7	31.7	261	nd

El análisis de las muestras de sedimentos, fue realizado en un espectrómetro de masas con tecnología de plasma ICP-AES en la Universidad de Chile USA-92. El análisis de los sedimentos mostró la presencia de los metales pesados: bario, cobalto, cromo,

molibdeno, cobre, níquel plomo, estroncio, zinc, mercurio y cadmio, cuyas concentraciones en microgramos por gramo ( $\mu\text{g/g}$ ), se muestran en la Tabla .3

Lugar	Muestra	Ba	Co	Cr	Mo	Cu	Ni	Pb	Sr	Zn	Hg	Cd
Río Seco N 13°37'33"	1	149.0	30.0	29.1	1.6	48.3	20.1	2.9	115.9	65.5	4.4	15.9
W 88°04'22" " h=172 msnm	2	179.5	28.6	19.1	4.6	74.8	14.9	13.7	123.6	47.4	2.8	13.3
Río La Majada N 13°37'32"	3	143.4	41.5	25.3	3.7	86.9	17.7	14.8	88.3	56.9	3.2	20.6
W 88°04'20" " h=172 msnm	4	150.6	43.4	20.5	2.7	81.3	21.8	9.8	88.6	68.0	3.4	14.3
Río Seco N 13°37'31"	5	159.2	35.5	21.5	3.3	74.7	16.7	9.5	107.7	51.8	3.5	25.5
W 88°04'25" " h=169 msnm	6	155.1	37.3	15.5	2.6	51.8	20.2	9.1	119.1	74.7	4.1	19.6
Río Sn Fco N 13°36'32"	7	225.9	30.0	15.6	3.3	70.2	16.7	14.9	190.3	53.3	bd	15.4
W 88°06'17" " h=159 msnm	8	172.3	34.7	17.4	3.1	35.7	15.6	7.7	122.6	71.5	3.4	20.3
Río Seco (e) N 13°36'31"	9	150.2	35.2	24.4	3.3	84.2	16.7	bd	122.7	56.3	4.6	19.4
W 88°06'09" " h=158 msnm	10	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Río Seco (s) N 13°36'27"	11	156	31.2	15.4	7.7	51.9	18.0	17.2	115.8	54.5	7.2	11.0
W 88°06'14" " h=156 msnm	12	156.4	33.0	18.6	3.1	58.4	20.2	3.5	98.5	55.8	5.7	bd
Río Corozal N 13°35'35"	13	135.7	36.4	15.4	4.3	59.9	13.6	bd	117.9	53.5	3.6	16.8
W 88°08'01" " h=131 msnm	14	137	37.4	18.5	4.5	68.7	14.3	6.4	106.2	53.5	4.4	16.2
Río Seco N 13°35'25"	15	140.8	32.0	18.2	3.9	51.2	17.3	9.6	109.4	57.5	4.5	14.8
W 88°07'55"		145							100			

## LOS RESULTADOS.

Los datos de la Tabla 2, que presentan los resultados para la detección de mercurio (Hg) en las aguas de los ríos investigados, no resultaron de mucha utilidad. Muy por el contrario, los datos de la Tabla 3, que presenta los resultados para la detección de metales pesados en los sedimentos de los ríos investigados, resultaron ser muy reveladores, cuando se contrastaron con los valores registrados en la siguiente Tabla de Directrices para la Evaluación de Afecciones en los Sedimentos Fluviales, tomada de la Guía Para la Evaluación de Sedimentos, del Departamento de Protección Ambiental de New Jersey, 1998.

**TABLE 1.**  
**FRESHWATER SEDIMENT SCREENING GUIDELINES**  
**Ontario (Persaud et al., 1993)**

**BOLD TYPE IN TABLE INDICATES ECOLOGICAL SCREENING VALUES TO BE USED IN THE BASELINE ECOLOGICAL EVALUATION (BEE).**

<u>Metals</u>	<u>Lowest Effects Level (LEL)</u> <sup>1</sup> (mg/kg, dry weight)	<u>Severe Effects Level (SEL)</u> <sup>2</sup> (mg/kg, dry weight)
Arsenic	<b>6</b>	33
Cadmium	<b>0.6</b>	10
Chromium	<b>26</b>	110
Copper	<b>16</b>	110
Lead	<b>31</b>	250
Mercury	<b>0.2</b>	2
Nickel	<b>16</b>	75

La Tabla muestra los valores de la concentración de los sedimentos en miligramos por kilogramo (mg/Kg) que son equivalentes a microgramos por gramo ( $\mu\text{g/g}$ ). También muestra en negritas los valores de afección ecológica en que deben ser usados como estándar para la evaluación ecológica de los ríos.

Así por ejemplo, para el mercurio (Hg), la tabla indica que el sedimento en los ríos debe tener una concentración de **0.2** como “nivel de efectos leves” de contaminación, pero en la tabla de muestreo se observa que en todos los sitios en los encuentros de los ríos, la concentración de mercurio está por encima de ese valor. Y que hay un sitio en el río Seco donde la concentración del mercurio llega al valor **7.2**, que resulta ser **36** veces mayor que el de “efectos leves”.

De la misma manera, en el caso del cadmio (Cd) según la tabla para la evaluación ecológica, el sedimento debe tener **0.6**, como “nivel de efectos leves” de contaminación, pero en la tabla de muestreo se observa que en todos los sitios en los encuentros de los ríos, la concentración del cadmio está por encima de ese valor. Y que hay un sitio en el río Guayabal donde la concentración del cadmio llega al valor **43** que resulta ser cerca de **72** veces mayor que el de “efectos leves”.

De igual forma se puede ver que para el cobalto (Co), todos los valores encontrados en los encuentros de los ríos están por encima de **26**, y se tiene un máximo de **47.2** en el río Guayabal. (El río Guayabal es el mismo río Seco luego de recibir las aguas del San Francisco).

El cobre (Cu) presenta todos sus valores por sobre **16** con un máximo de **97.2** también en el río Guayabal. El níquel (Ni) presenta valores críticos alrededor de **16**.

El resto de metales investigados, exceptuando el bario (Ba) y el estroncio (Sr), que no fue posible conocer sus valores límites, presentan valores abajo de los “niveles de efectos leves” de contaminación.

Como se puede ver, los resultados de la investigación demuestran que los sedimentos de los ríos de la vieja zona minera en la cuenca del río Grande de San Miguel, contienen “metales pesados” en concentraciones muy por arriba de los “niveles de efectos leves” de contaminación, aun después de un siglo de la época “dorada” del oro.

Obviamente, estos “metales pesados” no aparecieron de la nada ni cayeron del cielo; vincular la presencia de metales pesados con el uso de plaguicidas o pesticidas solo sería posible si en vez de zona minera se hubiera tenido alguna vez una zona de plantaciones a gran escala. Los grandes proyectos agrícolas y la industria pesada no han sido algo típico de la región nororiental de El Salvador.

Los “metales pesados” simplemente estaban con los sulfuros que siempre acompañan al oro en el subsuelo, y salieron (fueron sacados) con la extracción de materiales de la corteza terrestre, a través de las numerosas excavaciones en la zona minera de la cuenca del río Grande de San Miguel. Se puede verificar que al cavar un túnel minero de solo 100 metros de largo (de 2 metros de alto y 2 de ancho) el material sacado serviría para cubrir una cancha de fútbol con una capa de polvo que cubriría los tobillos de una persona. Nuestras viejas minas como las de El Divisadero en Morazán, cuentan con muchos túneles de varios kilómetros.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Si la presencia de “metales pesados” en los ríos de la zona minera de de la cuenca del río Grande de San Miguel tiene su origen en la extracción de materiales de la corteza



terrestre, a través de los pozos mineros como acción inherente e inevitable de la actividad minera, nos podemos preguntar qué efecto tiene todo esto en el “medio ambiente”, o sea en la Naturaleza (considerando, naturalmente, que las personas somos parte de la Naturaleza).

La respuesta resulta muy clara cuando podemos enterarnos de lo que son capaces los “metales pesados”. Veamos por ejemplo que pasa con el mercurio y el cadmio:

**El sistema nervioso (de las personas) es muy susceptible al mercurio. Las personas intoxicadas por haber inhalado mercurio, o por haber consumido agua o alimentos contaminados con mercurio, han sufrido daño permanente en el cerebro y los riñones.**

**El cadmio puede acumularse en los riñones debido a exposición a bajos niveles por largo tiempo, tanto en el aire, como en el agua o los alimentos; Esta acumulación puede producir enfermedades renales.**

Estas afirmaciones parecen graves, pero es necesario saber quien las sustenta. Estas afirmaciones son de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (*ATSDR* por sus siglas en ingles) Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU, Servicio de Salud Pública.

Por lo tanto, si se confía en la ATSDR, la conclusión es que la presencia de metales pesados en los sedimentos de los tributarios del río Grande de San Miguel, como herencia de la actividad minera en esa zona, constituye un enorme peligro para los habitantes de la región oriental de El Salvador.

Poco convencidos aun de esta grotesca conclusión, todavía nos podemos preguntar cómo es posible que se pueda hacer minería en Norteamérica y no se pueda hacer en nuestro pequeño país.

La respuesta es simple. Por una parte, como se dijo al principio de este artículo: **no se pueden violar las leyes de la física.**

1º) Hacer una excavación minera en Canadá, que es 500 veces más grande que El Salvador, es como abrir un pozo de 100 metros de profundidad en una hacienda o finca de las nuestras, los materiales sacados cabrían en un barranco dentro de la propiedad sin molestar a nadie. Pero hacer una excavación minera en El Salvador es como abrir el mismo pozo de 100 metros de profundidad en una casa de la colonia Santa Lucia en Ilopango; los materiales no solo no cabrían en la casa, sino que además sepultarían a los inquilinos y a los vecinos.

2º) Canadá tiene solo 3 habitantes por kilómetro cuadrado, pero El Salvador tiene más de 350. Esto significa que sólo el polvo de las 30 excavaciones mineras en proyecto, esparcido por el viento, sería suficiente para afectar a sus habitantes, a menos que estos abandonaran el país.

3º) Si la extracción de una onza de oro requiere cerca de 20 barriles de agua, y uno solo de los mas de 30 proyectos mineros pretende extraer medio millón de onzas, cabe preguntarse de donde saldrá toda el agua requerida, y luego a donde ira a parar toda esa agua convertida en lodo, al ser combinada con miles toneladas de roca pulverizada.

Por otra parte, debemos saber que además de las leyes de la física existen otras leyes.

En Norteamérica existen leyes de protección a la Naturaleza, con el propósito de evitar que desaparezcan los bosques y el agua. En nuestro país ya casi no tenemos bosques ni agua, y por ello además de ostentar el segundo lugar en deterioro ambiental en todo el continente americano. (El primer lugar lo tiene Haití), El Salvador todavía no cuenta con una ley efectiva que proteja por lo menos el agua.

¿Y qué se puede recomendar? Pues bien, como la contaminación por “metales pesados” no se puede eliminar porque estos metales además de ser letales son absolutamente no degradables (no se pueden quemar ni desaparecer), y aunque la Naturaleza alguna vez podrá eliminarlos, pero habrá que esperar muchos siglos, resulta necesario recomendar:

**Que el Estado salvadoreño no autorice la industrialización de ningún tipo de minería metálica en su territorio, en razón de evitar un mayor deterioro ambiental del que ya tenemos, y más fundamentalmente, en razón de intentar garantizar la vida de nuestros descendientes.**

Para muchas personas esto podrá parecer una exageración, pero en verdad no es ni una lágrima sobre un incendio cuando se observa la creciente destrucción del equilibrio de la Naturaleza causada por la voracidad depredadora de su especie más inteligente, la especie humana. Ciertamente nuestro planeta no es infinitamente grande, y las leyes de la física y las otras ciencias nos advierten que la Tierra no podrá soportar que por una parte la población mundial continúe aumentando en 90 millones de personas cada año, incrementando el consumo de recursos naturales, y por otra, que se incremente la conversión de bosques, pastizales y pantanos en parcelas de cultivo y centros urbanos, junto a la caza y la matanza de miles de especies vegetales y animales.

El desprecio o la ignorancia de las leyes de la Naturaleza, y el predominio mundial del actual modelo económico que le da mas valor al dinero que a la vida, ha llevado a la especie humana a propiciar la extinción de miles de especies, pero con ello, ha llegado a constituirse de manera absurda e inexorable en especie en peligro de extinción. Si la especie humana continúa privilegiando la demencia sobre la razón, destruyendo desesperadamente sus escudos protectores (la capa de ozono y la corteza terrestre), inundando además con sustancias toxicas el aire, el agua y los suelos, que son la fuente de la vida, su reinado en la Biosfera habrá colapsado en menos de un siglo. Otras especies, a lo mejor los insectos, nos superaran.

Todavía podríamos tener la creencia de que esto es solo fatalismo, propio de personas negativas que se oponen al desarrollo, y que eso de la capa de ozono, la corteza terrestre, el calentamiento global, la crisis energética y la recesión económica son problemas que afectan solo a los países industrializados. Con esta creencia podemos bajar la vista y mirar sólo a nuestro alrededor, donde la explotación irracional de los recursos naturales se ha convertido en el objetivo central de un “desarrollo económico” que busca obtener beneficios, según se dice, para lograr una mejor calidad de vida de toda la población. De continuar aceptando estas creencias, nuestros hijos y nietos solo podrán heredar además de la pobreza y el subdesarrollo, un desierto como país.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Academia de Ciencias de la URRSS, Academia de Ciencias de Cuba, La Dialéctica y los Métodos Científicos Generales de Investigación. Tomo I. 1998

American Chemical Society, Chemistry in Context, Wm. C. Brown Publisher. 1994

B.M. Yavorsky. Física. Editorial MIR Moscú 1977

Bernard J. Nebel, Richard T. Wright, Ciencias Ambientales. Prentice Hall Mexico 1999

Cahill H Isaack B. Sismicity and shape of the subduced Nazca plate. J. Geophys. Res. 1992; 97:17503-17529.

California Office of Environmental Health Hazard Assessment, 1999, California Sport Fish Consumption. Advisories, 1999: Sacramento, Calif., 9 p.

Carr M. J, Rose WI, Stoiber RE. Central America. In: Thorpe RS, ed. Andesites; orogenic andesites and related rocks. New York, Willey, 1982:149-166. Carr MJ, Symmetrical and Segmented variation of physical and geochemical characteristics of the Central America Volcanic front. J. Volcanol. Geotherm.Res. 1984; 20:231-252.

Hunerlach, M.P., Rytuba, J.J., and Alpers, C.N., 1999, Mercury contamination from hydraulic placer-gold mining in the Dutch Flat mining district, California: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4018B, p. 179- 189.

L.Landau, A. Ajezier, E.Lifshitz. Mecánica y Física Molecular. Editorial MIR Moscú, 1973

Malfait BT, Dinkelman MG, Circun-Caribbean Tectonic and Igneous Activity and the Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society of American Bulletin, V.83, p.251-272, 1972.

Meyer-Abich, H. Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador (América Central). An. Ser. Geol. Nac; No. 3. San Salvador, 1956 P. 102.

Plummer C., Mc Geary, Physical Geology. Wm. C. Brown Communication, Inc. USA, 1979.

Octubre de 2008

\*Rafael C. Cartagena.

Investigador del Instituto de Vulcanología de la Universidad de El Salvador.

Depto.de Física, Fac. Multidisciplinaria Oriental