

1. DEFINICIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA.

La lluvia ácida se forma cuando la humedad en el aire se combina con los óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre emitidos por fábricas, centrales eléctricas y vehículos que queman carbón o productos derivados del petróleo. En acción con el vapor de agua, estos gases forman ácido sulfúrico y ácido nítrico. Finalmente, estas sustancias químicas caen a la tierra en forma de precipitaciones, constituyendo la lluvia ácida.

El humo de un simple cigarro aunque parezca vulnerable también es una fuente secundaria de esta contaminación.

La lluvia “normal” también es ligeramente ácida debido al equilibrio entre el agua de lluvia y el CO₂ del aire, el cual se disuelve en cantidad suficiente en las gotas para dar una solución diluida de ácido carbónico. Pero si comparamos la lluvia “normal” con la lluvia ácida podemos ver claramente las diferencias entre ellas

En la actualidad, sobre amplias áreas del este de Norteamérica y del norte de Europa, donde predominan las fuertes precipitaciones pluviales, la lluvia cae con un pH cercano a 4'0 y, en raras ocasiones, de 3'0. Estas lluvias pueden provocar importantes daños en el ambiente

La lluvia ácida aumenta la acidez de los suelos, y esto crea cambios en la composición de los mismos, que produce la lixiviación de importantes nutrientes para las plantas, como el Ca, e infiltrando metales tóxicos, como el Cd, Ni, Mn, Pb, que de esta forma se introducen en las corrientes de agua.

En la actualidad hay datos que dicen que la lluvia es 100 veces más ácida que hace 200 años.

La lluvia ácida, término con el que se describe normalmente la sedimentación ácida tanto húmeda como seca es una adición bastante reciente a nuestro idioma. Este término se usó por primera vez hace 120 años, fue acuñado por el químico británico August Smith con base en sus estudios sobre el aire de Manchester, Inglaterra. No fue sino hasta que se creó una red de vigilancia de la calidad de la lluvia en el norte de Europa, en la década de 1950, cuando se reconoció la incidencia generalizada de la lluvia ácida.

Durante la última década, la lluvia ácida ha sido un importante motivo de preocupación porque continúa contaminando grandes áreas de nuestro planeta.

La primera vez que se planteó este inconveniente en un foro ecológico fue en el año 1972 durante la Conferencia de las Naciones Unidas realizada en Estocolmo. El objetivo de esta reunión era plantear los problemas sobre el Medio Ambiente.

El Gobierno de Suecia presentó un amplio informe en relación a la polución del aire desde países remotos (por medio de los vientos provenientes del Este, se arrestaban altas concentraciones de azufre generando la participación con este componente con las lluvias).

El origen de los compuestos oxidados de azufre eran las plantas térmicas ubicadas en Gran Bretaña. Manifestaron, además, que esta contaminación dañaba los ecosistemas nórdicos generando la contaminación de los lagos y el agua a través de las lluvias ácidas o nevadas con altos contenidos de ácido sulfúrico.

2. UN PROBLEMA MUNDIAL.

Este tipo de precipitación ha sido motivo de preocupación porque no ha parado de contaminar nuestra área.

La lluvia ácida es un fenómeno muy conocido en el mundo entero, destaca en las zonas de alta industrialización, producida por los gases contaminantes entre los que se encuentran los óxidos de azufre y nitrógeno. La aparición de esta lluvia se puede saber gracias a la presencia de manchas de color claro y la presencia de un polvillo grasiento marrón que se deposita en todas partes.

Los efectos de la acidez en las poblaciones de peces y otros animales acuáticos es la gran preocupación. Incluso parece probable que las lluvias agrias pudieran introducirse en las reservas de aguas subterráneas y aumentarían la solubilidad de los metales tóxicos.

Las aguas ácidas disuelven también metales como el plomo y el cobre de las tuberías de agua caliente y fría.

Las consecuencias en el turismo y en los usos recreativos de lagos y ríos podrían haber sido enormes. Por suerte, desde la década de 1980 se ha avanzado mucho en la reducción de las emisiones de dióxido de azufre y algunos lagos muestran señales de recuperación.

3. FORMACIÓN.

La lluvia ácida es una de las múltiples consecuencias de que el aire se encuentre contaminado. Y el aire se contamina cuando cualquier tipo de combustible se quema, ya que se liberan diferentes productos químicos. En las centrales eléctricas, las fábricas, maquinarias y coches se queman combustibles, carbón o productos derivados de petróleo, por lo tanto, son productores de gases contaminantes. Algunos de estos gases,

sobre todo los que expulsan las centrales térmicas y las fábricas de productos químicos, son vertidos de dióxido de azufre y óxido de nitrógeno y al ponerse en contacto con la humedad del aire o el vapor de agua se transforman en ácido sulfúrico, ácido nítrico y ácido clorhídrico. Estos ácidos se depositan en las nubes y vuelven a la Tierra en forma de lluvia o nieve, que se la denomina lluvia ácida.

En la lluvia ácida, debido a la presencia del CO₂ atmosférico, que forma ácido carbónico (H₂CO₃), presenta un pH de menos de 5 y puede llegar a alcanzar el pH del vinagre, que es el pH 3.

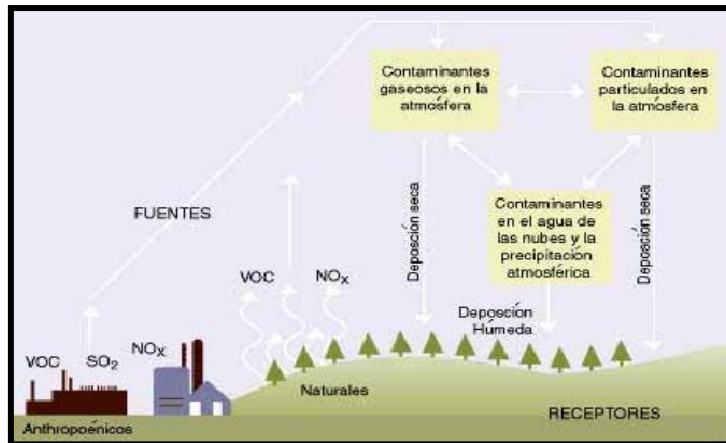
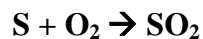
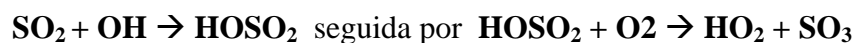


IMAGEN 5. Formación de la lluvia ácida.

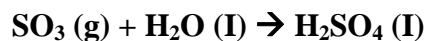
Sabemos que los culpables de la formación de la lluvia ácida, mayormente, somos las personas, pero una gran parte del dióxido de azufre emitido a la atmósfera procede también de la emisión natural que se produce por las erupciones volcánicas que son fenómenos irregulares.



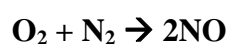
Los procesos industriales en los que se genera SO₂, por ejemplo, son los de la industria metalúrgica. En la fase gaseosa el dióxido de azufre se oxida por reacción con el radical hidroxilo por una reacción intermolecular.



En presencia del agua atmosférica o sobre superficies húmedas, el trióxido de azufre (SO₃) se convierte rápidamente en ácido sulfúrico (H₂SO₄).



El NO se forma por reacción entre el oxígeno y el nitrógeno a alta temperatura.



Una de las fuentes más importantes es a partir de las reacciones producidas en los motores calientes de los automóviles y aviones, donde se alcanzan temperaturas muy altas. Este NO se oxida con el oxígeno atmosférico.



El NO se oxida con el oxígeno atmosférico y reacciona con el agua dando ácido nítrico (HNO_3), que se disuelve en el agua.



4. DEPOSICIÓN.

Algunas moléculas que contaminan la atmósfera son ácidos o se convierten en ácidos con la lluvia. En zonas de industria la lluvia es más ácida de lo normal y partículas secas ácidas caen sobre la superficie.

En ciertas industrias se libera, al aire atmosférico, cantidades de óxido de azufre y nitrógeno, esa contaminación es trasladada a otros lugares. A esto se le llama contaminación transfronteriza.

Los contaminantes atmosféricos que ayudan a formar la lluvia ácida no siempre son emitidos en el lugar en que cae esta lluvia, sino que pueden recorrer grandes distancias debido a los vientos que los desplazan cientos o miles de kilómetros antes de caer a la Tierra.

4.1. Deposición seca.

Ocurre normalmente a pocos kilómetros del foco emisor. Consiste en el retorno al medio de gases como los óxidos de azufre y de nitrógeno en forma de partículas o de aerosoles, siendo depositados en forma seca. La deposición seca está además constituida por partículas de polvo, llamadas partículas suspendidas, que se conocen generalmente como polvo atmosférico, las cuales, pueden ser también de carácter básico.

La mitad de la acidez de la atmósfera se debe a la deposición en forma seca, como gas o en forma de pequeñas partículas.

4.2. Deposición húmeda.

Es el material contaminante que desciende con la lluvia, incluye partículas y gases barridos del aire por las gotas de lluvia.

Generalmente, la precipitación húmeda tiene mayor importancia y es más conocida por ser la causante de la acidificación en el medio, dejando muchas veces a un lado las precipitaciones secas.

Este tipo de deposición se forma cuando los compuestos gaseosos precursores de la lluvia ácida entran en contacto con el vapor de agua, la luz y el oxígeno de la atmósfera y se crea una mezcla de ácido sulfúrico y ácido nítrico. Después de estos procesos y de estas reacciones catalíticas iniciadas en forma fotoquímica en la atmósfera, esta mezcla viaja muchos kilómetros, precipitándose y cayendo al medio en forma de deposición húmeda.

El ácido producto de este proceso, se deposita en solución en el terreno y los vegetales durante las precipitaciones atmosféricas. El proceso de generación de las precipitaciones ácidas húmedas, sigue entonces, dos etapas: la oxidación catalítica y la oxidación fotoquímica.

4.2.1. Oxidación catalítica.

La oxidación catalítica es un proceso destructivo similar a la oxidación térmica pero tiene lugar a más baja temperatura debido a la presencia de un catalizador. La temperatura habitual de funcionamiento es de entre 250 a 400 °C. Así pues, los sistemas de oxidación catalítica tienen un menor consumo energético que los de oxidación térmica ya que la reacción de oxidación se realiza a más baja temperatura; por tanto, existe un menor riesgo de formación de subproductos indeseables de oxidación (como CO, NOx y dioxinas).

En contrapartida, los catalizadores con el tiempo van perdiendo su eficacia y deben ser repuestos cada 2-5 años, lo que supone un coste de gestión del catalizador agotado como residuo y además un coste de adquisición del nuevo catalizador. La eficiencia de depuración de los sistemas catalíticos suele ser superior al 98% de destrucción del COT.

5. TRANSPORTE.

El gradiente de temperatura negativo que caracteriza a la troposfera es la causa de que en esta región prevalezcan movimientos de las masas de aire, no solamente horizontales al igual que ocurre en la estratosfera, sino que además tienen lugar movimientos ascensionales. Estos movimientos del aire de tipo colectivo ayudan a la dispersión de los contaminantes y a su dilución en la atmósfera disminuyendo su impacto ambiental.

A diferencia de lo que ocurre por debajo de la capa de mezcla, en que los movimientos de las masas de aire son muy variables, a menudo de régimen turbulento, que cambian con frecuencia de dirección, debido a lo abrupto del relieve superficial,

en la troposfera los movimientos de las masas de aire son mucho más regulares. En la práctica se pueden distinguir en esta zona unos modelos de circulación global que afectan a todo el planeta. De hecho, la existencia de este régimen global de vientos se conoce desde hace mucho tiempo, pues ya se tenía en cuenta en el trazado de las rutas durante los primeros tiempos de la navegación marítima, de la misma forma que se consideran actualmente en el diseño de las rutas aéreas.

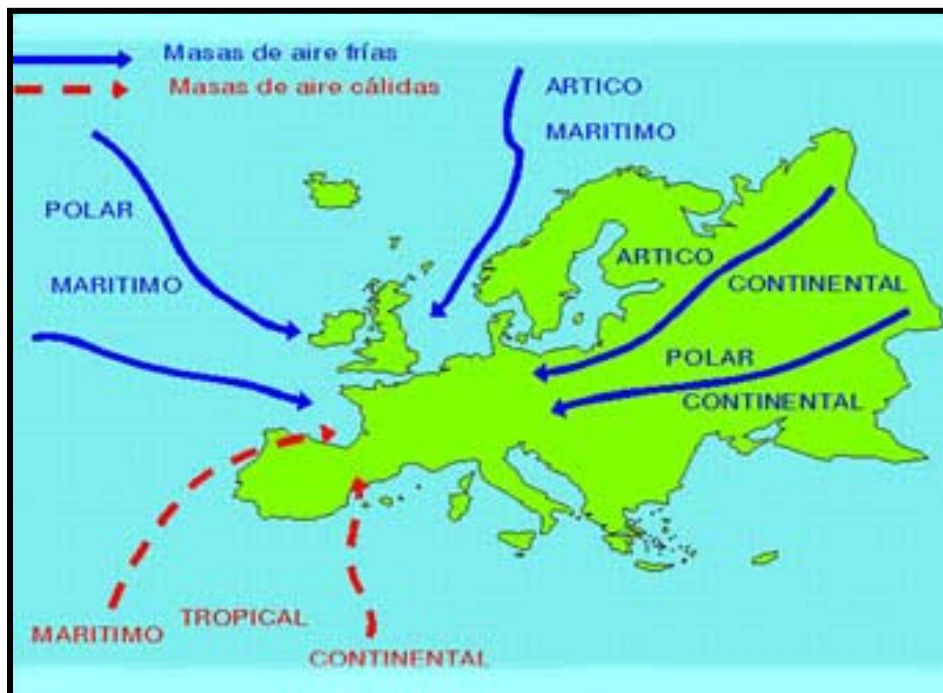


IMAGEN 6. Movimiento de las masas de aire

La causa del establecimiento de esta circulación global de las masas de aire por todo el planeta, reside en que la distinta intensidad de la radiación solar es mayor en el Ecuador, lo cual produce un gradiente de temperatura que obliga al aire ecuatorial, que es más caliente, a desplazarse hacia latitudes mayores. A este movimiento de las masas de aire también contribuye, aunque de forma indirecta, el almacenamiento de calor por parte de los océanos durante el verano y su liberación gradual en la época invernal. Este fenómeno tiene, por otro lado, un papel decisivo en la moderación del clima en el planeta.

En el Ecuador, el calentamiento del aire cerca del suelo provoca su ascensión y su simultánea expansión, lo cual da lugar a un aumento de presión. El gradiente de presión negativo en el sentido Norte-Sur, ocasiona un desplazamiento de las masas de aire ecuatorial hacia latitudes menores, al mismo tiempo que se ven forzadas a

descender de altitud. Una vez las masas de aire llegan al Polo, inician el retorno hacia el Ecuador, si bien la trayectoria se realiza a alturas inferiores a las correspondientes al viaje de ida.

Durante el retorno de las masas de aire, estas absorben calor y humedad del océano, de tal manera que al llegar al Ecuador, y a causa de la mayor irradiación de la luz solar, el aire se eleva, provocando la condensación del vapor de agua y el consiguiente enfriamiento de la atmósfera ecuatorial. Es por esta razón que en esta parte del planeta se registra la mayor concentración de lluvias.

Este sistema de circulación de vientos de dirección Norte-Sur, se realiza de forma independiente en los dos hemisferios, existiendo una pequeña región de calma ecuatorial que separa los movimientos de las masas de aire en estas dos zonas. En realidad, la presencia de esta región dificulta el intercambio de contaminantes entre los dos hemisferios y es, por lo tanto, la causa de que exista una cierta asimetría en cuanto a la distribución de los contaminantes en ambos hemisferios.

En este sentido, se observan mayores niveles de contaminación en los hemisferios Norte que en el Sur, debido a que en aquel es donde se concentran los países más industrializados y, en consecuencia, mayor es el número de fuentes emisoras de contaminación. Además, la proporción de océano, que es el principal sumidero de contaminantes, respecto a la superficie continental es significativamente mayor en el hemisferio Sur que en el Norte.

En realidad, este modelo de circulación de los vientos en la dirección Norte-Sur que se acaba de describir, y corresponde a una situación hipotética en que la Tierra estuviese fija, exponiendo siempre la misma cara de la superficie a la radiación solar. Esta no es, de hecho, la situación real, pues la Tierra gira sobre sí misma con una inclinación ecuatorial de 23 grados, y también gira alrededor del Sol describiendo una órbita eclíptica. En consecuencia, la Tierra, mientras gira, va presentando nuevas áreas a la exposición a la radiación solar, lo cual altera un poco el régimen de vientos descrito hasta ahora.

Otro de los efectos debidos la rotación de la Tierra es el establecimiento de sistemas circulatorios perpendiculares al sistema Norte-Sur. Esta circulación transversal, predominantemente se establece en el sentido Oeste-Este y a latitudes medias. Por el contrario el sentido opuesto de circulación tiene lugar a latitudes bajas, y origina los vientos alisios. Debido a este sistema circulatorio, se encuentran al mismo nivel masas de aire caliente y húmedo provenientes del ecuador, con masas frías y secas del polo.

Esto crea una inestabilidad atmosférica que se traduce en una sucesión en cadena de ciclones y anticiclones itinerantes.

Los ciclones son sistemas de bajas presiones que favorecen movimientos ascensionales de las masas de aire, y por tanto, están asociados a tiempos húmedos y lluviosos, mientras que por el contrario los anticiclones son sistemas de altas presiones que originan movimientos descendentes de las masas de aire, y que dan lugar a tiempos secos y soleados.

Los vientos de tipo Oeste-Este que prevalecen a latitudes medias, tienen mucha importancia en la dilución de los contaminantes a puntos muy lejanos de su lugar de emisión. Por ejemplo, a una velocidad media de 35 m/seg., característicos del viento que sopla a 30 grados de latitud, el tránsito de los contaminantes alrededor del globo es de unos 12 días, siempre y cuando antes no se haya degradado químicamente.

Además del sistema global de circulación de las masas de aire por todo el planeta, se han de considerar también otros movimientos periódicos de ámbito local. Este es el caso de las brisas marinas que se establecen en las zonas costeras a causa de las diferencias que tienen lugar entre el continente y el mar. Durante el mediodía, la temperatura en tierra firme es mayor que la correspondiente al mar y, en consecuencia, el aire continental es reemplazado por aire marino, bastante más fresco, dando lugar a la brisa marina. Por otro lado, durante la noche ocurre el proceso inverso, es decir, el rápido enfriamiento de la superficie continental con respecto a la temperatura del agua del mar, origina un flujo de aire en sentido contrario denominado brisa continental.

En los valles también se forman vientos locales debido al establecimiento de un gradiente de temperatura entre las laderas, más soleadas, y el fondo más frío. En las ciudades, y a causa del calor almacenado durante el día por los materiales de construcción (cemento, piedra, alquitrán, etc.), se forman durante el día las denominadas islas de calor, en las que se forma un régimen de vientos cíclicos en el área urbana, de tal manera que impide la dispersión de los contaminantes emitidos por las actividades antropogénicas en la ciudad.

6. EFECTOS.

La lluvia ácida huele, se ve y se siente igual que la lluvia normal, y podríamos decir que podemos bañarnos con ella sin sentir un efecto inmediato especial. El daño que nos produce a las personas no es directo, es más rápido el efecto de los

contaminantes que producen esta lluvia o que llegan al organismo cuando se los respira, afectando a nuestra salud.

Debido a su acidez esta lluvia provoca la acidificación de las aguas de los ríos, lagos y mares y esto hace complicado el desarrollo de vida acuática en esta agua, lo que aumenta en gran medida la mortalidad de peces. Por otra parte también afecta directamente a la vegetación, por lo que produce daños importantes en los bosques y acaba con la mayoría de los microorganismos fijadores de nitrógeno.

Concretando en la situación de los bosques, se ve que la lluvia ácida no mata directamente a plantas y árboles, sino que actúa a través de ciertos mecanismos que los debilitan, haciéndolos más vulnerables a la acción del viento, el frío, la sequía, las enfermedades y los parásitos.



IMAGEN 7. Efectos de la lluvia sobre las plantas.

La lluvia ácida ataca directamente las hojas de los vegetales, despojándolas de su cubierta cerosa y provocando pequeñas lesiones que alteran la realización de la fotosíntesis. Con ello, las plantas pierden hojas y así, la posibilidad de alimentarse adecuadamente.

Pero entre todo encontramos una excepción: a la mayoría de los cultivos no les afecta la lluvia ácida, no son tan vulnerables a sus efectos cuando son abonados con fertilizantes que restituyen nutrientes y amortiguan la acidez.

La “lluvia ácida” comprende la sedimentación de contaminantes ácidos que pueden producir el daño de la superficie de los materiales. Estos contaminantes que escapan a la atmósfera al quemarse carbón y otros componentes fósiles reaccionan con el agua y los oxidantes de la atmósfera y se transforman químicamente en ácido sulfúrico y nítrico. Los compuestos ácidos se precipitan, y entonces van a la tierra en forma de lluvia, nieve o niebla, o pueden unirse a partículas secas y caer en forma de sedimentación seca.

Estas consecuencias alteran la cantidad química del suelo y del agua dulce, afectando las cadenas alimenticias destruyendo floresta y lagos. Las sustancias ácidas están deteriorando las estatuas, monumentos y otras edificaciones construidas en mármol.



IMAGEN 8. Monumento erosionado por el efecto de la lluvia sobre las plantas.

La lluvia ácida, por su naturaleza, ataca a las construcciones y a las infraestructuras. Por ejemplo puede disolver el carbonato de calcio y afectar de esta forma a los monumentos y edificios construidos con mármol o con piedra caliza.

Se sabe que los nitratos y sulfatos, que forman la lluvia ácida, sumados a los compuestos de los suelos, contribuyen al aumento de sustancias nutritivas de ríos, lagos, embalses y regiones costeras, y esto provoca un exceso de fitoplancton en los mismos y esto deteriora sus condiciones ambientales y naturales afectando

negativamente a su aprovechamiento.

La piedra cuando entra en contacto con la lluvia ácida, reacciona y se transforma en yeso, que se disuelve en agua con mucha facilidad.

Un estudio realizado en 2005 por Vincent Gauci de *Open University*, sugirió que cantidades relativamente pequeñas de sulfatos presentes en la lluvia ácida tienen una fuerte influencia en la reducción de gas metano producido por metanógenos en áreas encharcadas, lo cual podría tener un impacto, aunque sea leve, en el efecto invernadero.

Esta lluvia también afecta a los ecosistemas acuáticos. Las interacciones entre los organismos vivos y la química de sus habitantes acuáticos son extremadamente complejas. Si el número de ejemplares de una especie o de un grupo de especies cambia en respuesta a la acidificación, el ecosistema de todo el cuerpo de agua puede resultar afectado por la relación presa-depredador de la red de alimentación. Según aumenta la acidez, más y más especies de plantas y animales declinan o desaparecen.

En la vida de las plantas estos efectos son distintos. Tanto la vegetación natural como las cosechas pueden resultar afectadas de las siguientes maneras:

- Al alterar la capa cerosa protectora de las hojas, lo que baja la resistencia a la enfermedad.
- Al inhibir la germinación de la planta y su reproducción.
- Acelerando la descomposición del suelo y la remoción de los nutrientes.

Los contaminantes que producen la lluvia ácida, (dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno) si son perjudiciales para la salud humana. Estos gases interactúan en la atmósfera y forman partículas finas de sulfato y nitrato que pueden ser transportadas por el viento a grandes distancias y ser inhaladas profundamente dentro de los pulmones de las personas. Muchos estudios científicos han establecido una relación entre los niveles elevados de partículas finas y aumento de las enfermedades y las muertes prematuras provocadas por problemas cardíacos y pulmonares, como el asma o bronquitis.

Por razones de salud, el SO_2 y los NO_x se han regulado históricamente conforme a la Ley del Aire Limpio, incluido el Programa para la Lluvia Ácida. En las regiones del Este de los Estados Unidos, los aerosoles de sulfato representan alrededor del 25 por ciento de las partículas finas. Al disminuir las emisiones de SO_2 y NO_x de las plantas generadoras de energía, el Programa para la Lluvia Ácida reducirá los niveles de partículas finas de sulfato y nitrato, disminuyendo así la incidencia y la gravedad de esos problemas de salud.

También se prevé que la disminución en las emisiones de óxidos de nitrógeno tenga un beneficio en la salud humana, al reducirse los óxidos de nitrógeno que pudieran reaccionar con compuestos orgánicos volátiles y formar ozono.

Entre los efectos del ozono en la salud humana se cuentan varios riesgos de mortalidad y morbilidad derivados de la inflamación pulmonar, incluidos el asma y el enfisema.

6.1. Efectos de los gases.

El humo y los gases provenientes de automotores y fábricas forman ácidos al mezclarse con el aire. Si el humo contiene dióxido de azufre, al mezclarse con el vapor de agua, la lluvia contendrá ácido sulfúrico. Si el humo contiene óxido de nitrógeno, en el agua de lluvia habrá ácido nítrico.

Tienen efecto negativo sobre el crecimiento de las plantas, pierden sus hojas y se debilitan, destruyen también sustancias vitales del suelo y depositan metales venenosos como el aluminio que dificulta la respiración y la fotosíntesis de los vegetales.

Los ácidos reaccionan con minerales metálicos y forman sales entre ellos el carbonato de calcio. El agua potable puede ser contaminada fácilmente por la lluvia ácida liberando sustancias químicas al mezclarse el aluminio y plomo, sustancias dañina a la salud.

Conceptualmente la acidez no neutralizada por la copa de los árboles, entra al suelo por vía infiltración provocando:

- Disminución del pH (el aluminio se hace soluble con $\text{pH} < 4,2$).
- Incremento de la movilidad de metales pesados.
- Reducción de los nutrientes al variar su ciclo.

La cantidad de sulfatos y nitratos en los suelos es acumulativa, no se resolverá en poco tiempo y contribuye esto a la acidificación de las aguas subterránea por lo que tiene una fuerte incidencia en la salud humana. El efecto directo es la observación de metales en la cadena alimenticia, provocando acumulación de Pb en los huesos, riñones e hígado. El efecto indirecto esta relacionado con la desaparición de bosques y por el asentamiento de población cada vez más numerosa.

Estos son una recopilación de los efectos perjudiciales de la lluvia ácida tiene en los ecosistemas y sobre los materiales:

- Acidificación del agua.
- Agotamiento del suelo.
- Efectos negativos sobre la salud.
- Desaparición de plantas y animales.
- Daños en bosques y su desaparición.
- La corrosión y destrucción de la herencia cultural.
- Trae las enfermedades para los seres vivos.
- Trae la decadencia para los ecosistemas.
- Daños en los ecosistemas acuáticos.
- Alteraciones en la reproducción de los seres vivos.

7. LA SEDIMENTACIÓN ÁCIDA.

El factor principal es que los seres humanos comen alimentos, beben agua y respiran aire que está en contacto con la sedimentación ácida.

Estudios realizados en los Estados Unidos y Canadá afirman que existen lazos entre ese tipo de contaminación y los problemas respiratorios en estratos sensibles de la población, como los niños y los enfermos asmáticos.

La sedimentación ácida puede incrementar los niveles de metales tóxicos tales como aluminio, cobre y mercurio depositados en los abastecimientos no tratados de agua potable.