

Contaminantes

Deposición ácida

Principales consideraciones

- La deposición ácida (por lo común llamada *lluvia ácida*) degrada la calidad de bosques, ecosistemas costeros, lagos y suelos; provoca daños a la vida silvestre, y corroe los materiales de las edificaciones. Las emisiones acidificantes pueden cruzar las fronteras nacionales y de entidades federativas, afectando ecosistemas a cientos de kilómetros de distancia.
- El dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) son emisiones acidificantes que contribuyen a los depósitos ácidos. Estos compuestos químicos se emiten principalmente por actividades humanas como la fundición de metales y el uso de combustibles fósiles para el transporte y la generación de electricidad.
- A partir de 1990 las emisiones de SO_2 en América del Norte han disminuido un tercio, en tanto que las de NO_x han registrado un reducción de un poco más de la quinta parte. El depósito de sulfatos en la zona oriental de Estados Unidos y Canadá ha tenido una disminución significativa en los pasados 15 años, mientras que la baja en la deposición de nitratos ha sido menos señalada.
- A pesar de los considerables avances en la reducción de las emisiones y la deposición de contaminación acidificante, un elevado número de ecosistemas vulnerables recibe aún depósitos ácidos por encima de los umbrales que causan daños de largo plazo. Además, algunas regiones previamente afectadas por niveles altos de depósitos ácidos no se están recuperando como se había previsto.

La *deposición ácida* resulta principalmente de la transformación de contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) en contaminantes secundarios como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el nitrato de amonio (NH_4NO_3) y el ácido nítrico (HNO_3). Las partículas y los vapores acidificantes pueden depositarse en la superficie terrestre en forma de precipitación ácida (deposición húmeda) o de partículas como ceniza suspendida, sulfatos, nitratos y gases (deposición seca).

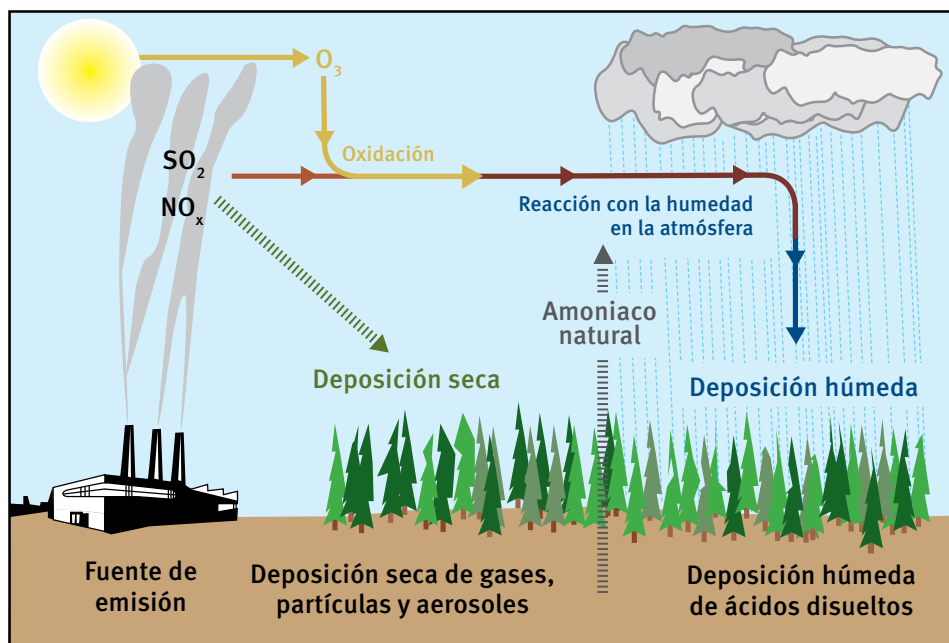
¿Cuál es la problemática ambiental?

La deposición ácida ha dañado ya bosques, lagos, suelos, edificios y monumentos históricos de América del Norte, en algunos casos de manera irreversible. Los contaminantes atmosféricos que dan origen al depósito ácido también afectan la salud humana y la calidad del aire, pero el problema no es exclusivo de América del Norte. Debido a que los contaminantes acidificantes pueden transportarse grandes distancias en la atmósfera para depositarse en ecosistemas a cientos e incluso miles de kilómetros de distancia, la deposición ácida es un problema mun-

dial. Las emisiones de América del Norte viajan tan lejos como Europa y las originadas en Asia afectan la salud humana y el medio ambiente de América del Norte.

Los contaminantes atmosféricos, en particular las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno, son precursores de la deposición ácida. En América del Norte el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) son emitidos no sólo por fuentes antropogénicas como la fundición de metales y la quema de combustible fósil en la generación de electricidad y el transporte, sino también por fuentes naturales como volcanes, incendios forestales y relámpagos. No

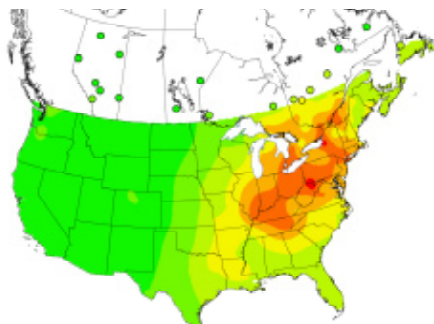
El proceso de la deposición ácida



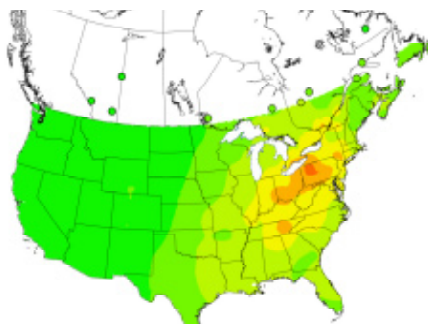
Fuente: Adaptado de Michael Pidwirny, *Physical Geography.net—Fundamentals of Physical Geography*, <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8h.html>.

Deposición húmeda de sulfatos y de nitratos en Canadá y Estados Unidos

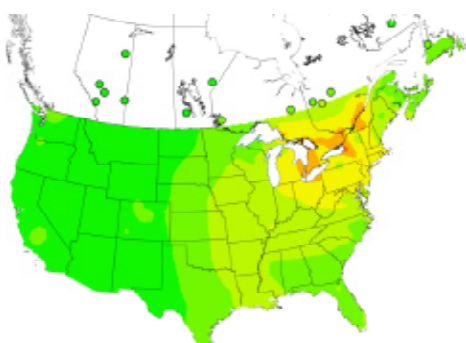
Deposición húmeda media de sulfatos en cinco años (1990-1994)



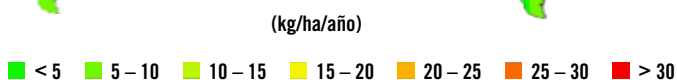
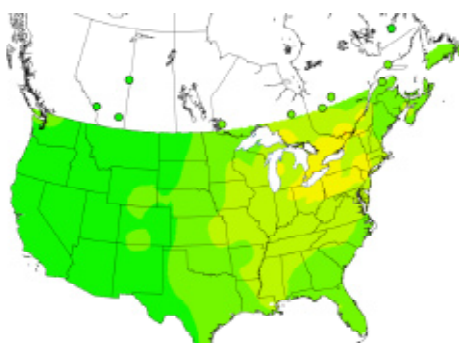
Deposición húmeda media de sulfatos en cinco años (2000-2004)



Deposición húmeda media de nitratos en cinco años (1990-1994)



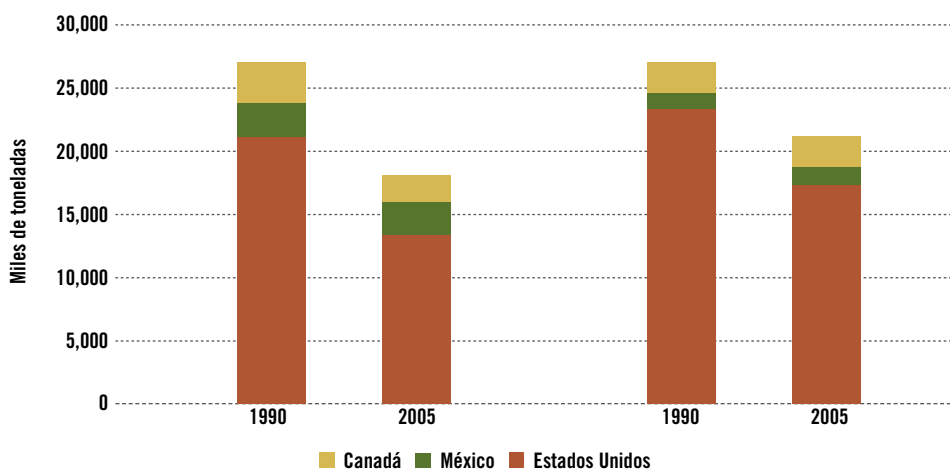
Deposición húmeda media de nitratos en cinco años (2000-2004)



Fuente: NATChem. Mapas, cortesía de Chul-Un Ro, ministerio de Medio Ambiente de Canadá (*Environment Canada*).

Emissiones atmosféricas de SO₂

Emissiones atmosféricas de NO_x



Fuentes: Ministerio de Medio Ambiente de Canadá (*Environment Canada*), Agencia de Protección Ambiental (*US Environmental Protection Agency*) e Instituto Nacional de Ecología de México (los datos más recientes de México corresponden a 2002).

obstante, la gran mayoría de las emisiones de SO₂ y de NO_x que contribuyen a la deposición ácida son producto de actividades humanas.

La acidificación de los ecosistemas ocurre cuando la deposición de compuestos ácidos excede la capacidad neutralizadora del medio ambiente receptor. El agua de lluvia limpia es ligeramente ácida, con un pH de alrededor de 5.6, debido a que contiene dióxido de carbono disuelto del aire. La contaminación acidificante tiene un pH menor, por lo general entre 4 y 5. La disminución de un solo punto en el pH representa un aumento de diez veces en la acidez. Por tanto, el agua de lluvia con pH de 4.2 es cerca de 25 veces más ácida que en su estado limpio. Al hacer más ácidos los suelos y el agua, la deposición ácida perjudica a las plantas, los animales y la integridad del ecosistema en las zonas afectadas, y daña también construcciones, monumentos y pintura de superficies.

En un lago, la deposición ácida crea una cascada de efectos que reducen las poblaciones de peces y pueden, incluso, llegar a eliminar especies de éstos que habitan un cuerpo de agua. Conforme la lluvia ácida se escurre por el suelo de una cuenca hídrica, metales como el aluminio se descargan en los lagos y las corrientes de esa cuenca. Tanto el bajo pH como los niveles más altos de aluminio resultan directamente tóxicos para los peces. Además, provocan presiones crónicas que, aunque no maten un pez en lo individual, conducen de hecho a la disminución del peso y el empequeñecimiento de las dimensiones del cuerpo, y hacen que los peces sean menos capaces de competir por los alimentos y los hábitats. La acidificación de lagos y arroyos puede también incrementar la cantidad de metil mercurio en los sistemas acuáticos. En ciertos lagos de Canadá y Estados Unidos con un bajo pH se han detectado en los colimbo grandes —aves marinas similares al pato— niveles elevados de mercurio en sangre.

En los suelos boscosos, el exceso de deposición ácida incrementa la susceptibilidad de los bosques frente a presiones por plagas, agentes patógenos y cambios climáticos, lo que se traduce en menor salud forestal, menor rendimiento de la madera y modificaciones en la composición de las especies forestales. La lluvia ácida debilita los árboles al dañarles las hojas, limitar los nutrientes de que disponen o exponerlos a sustancias tóxicas liberadas lentamente por el suelo. Muy a menudo, estos efectos de la lluvia ácida, en combinación con alguna(s) otra(s) amenaza(s), terminan por lesionar o matar a los árboles.

Por último, los contaminantes que causan la lluvia ácida son dañinos para la salud humana. En el aire se juntan con otras sustancias químicas para producir esmog, que puede irritar los pulmones y dificultar la respiración, sobre todo en quienes padecen asma, bronquitis u otros males respiratorios. Las partículas suspendidas finas que contienen sulfatos derivados del SO_2 se consideran particularmente dañinas para los pulmones.

¿Por qué es importante este asunto para América del Norte?

Los efectos de la deposición ácida en toda América del Norte se pueden abordar sólo mediante la cooperación de las jurisdicciones vecinas que contribuyen a las emisiones acidificantes. La problemática de la lluvia ácida llamó por primera vez la atención del público a finales del decenio de 1970 y principios de los ochenta, cuando se conocieron sus devastadores efectos en los ecosistemas de la región oriental de América del Norte. En 1980 Canadá y Estados Unidos comenzaron a colaborar para atender este asunto transfronterizo. Ambas naciones firmaron en 1991 el Acuerdo Canadá-Estados Unidos sobre Calidad del Aire para fomentar el conocimiento científico y promover la reducción de la contaminación en los dos países.

Esfuerzos para reducir las emisiones

Canadá y Estados Unidos dieron prioridad a las emisiones de SO_2 por considerarlas más importantes para aminorar los daños en los ecosistemas vulnerables. Desde 1990 las emisiones atmosféricas de SO_2 en América del Norte han disminuido casi un tercio (véase la gráfica). En la actualidad la generación de energía eléctrica da cuenta de las mayores emisiones de SO_2 en Estados Unidos, en tanto que en Canadá el sector con mayores emisiones es el de fundición de metálica básica.

En el mismo periodo, las emisiones atmosféricas de NO_x se redujeron en apenas poco más de una quinta parte (véase la gráfica). Las fuentes móviles —sobre todo autos y camiones— son las fuentes más significativas de óxidos de nitrógeno en América del Norte; el resto proviene de las centrales eléctricas y otras fuentes.

Resultados

Como respuesta a las reducciones de las emisiones de SO_x y NO_x , los niveles de deposición de sulfato en el oriente de Estados Unidos y Canadá disminuyeron considerablemente durante 1990-2004,

Estudio de caso – Acidificación de El Tajín, México



Pirámide de los Nichos, El Tajín, Veracruz, México. Foto: Luiz Castro.

Ubicado en el actual municipio de Papantla de Olarte en Veracruz, El Tajín fue una de las ciudades más importantes de la zona del golfo mesoamericano. Su sitio arqueológico alberga construcciones que se remontan al año 100 d.C. De 600 a 1150 d.C. la ciudad alcanzó su mayor esplendor y máxima extensión.

Humberto Bravo Álvarez y un equipo de la sección sobre contaminación ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México estudian los efectos de la lluvia ácida en los sitios arqueológicos e históricos de El Tajín. Del 18 de agosto de 2002 al 9 de abril

de 2003 recolectaron 40 muestras de lluvia en ese lugar y aplicaron análisis de trayectoria atmosférica a cada muestra de precipitación con objeto de determinar las rutas de transporte aéreo correspondientes a las precipitaciones. Los modelos de trayectoria sirven para identificar las regiones viento arriba (a barlovento) con probabilidades de contribuir a la concentración de contaminantes en los receptores a sotavento.

Los análisis indican que 85 por ciento de los eventos de precipitación para los que se tomaron muestras en El Tajín correspondieron a lluvia ácida ($\text{pH} < 5.62$). El análisis de la trayectoria inversa de estos fenómenos de acidez registró una gran variación, lo que indica que no hubo preferencia direccional aparente para el transporte durante tales eventos y sugiere la importancia de las fuentes locales. La zona arqueológica de El Tajín está rodeada de posibles fuentes de precursores de lluvia ácida en la forma de industrias que queman petróleo con un elevado contenido de azufre (como centrales eléctricas y refinerías). Así, tanto estas fuentes como las más distantes podrían ser importantes contribuyentes de la acidez de la lluvia en El Tajín.

aunque los cambios en los niveles de deposición de nitratos han sido menos marcados (véanse los mapas).

Áreas afectadas

Muchos de los sistemas marinos y terrestres del oriente de América del Norte son incapaces de neutralizar la acidez de modo natural, por lo que son particularmente vulnerables a la deposición ácida. A fin de comprender la capacidad de los ecosistemas para absorber la deposición ácida, los científicos desarrollaron el concepto de “carga o concentración crítica”; es decir, el cálculo de la cantidad de deposición ácida que determinado ecosistema puede recibir sin que se registren efectos dañinos. La carga crítica depende del contenido de sustancias base neutralizantes de ácido, como las sales de calcio y magnesio, en el agua de una región y en las rocas y suelos circundantes.

Pese a los avances en la reducción de las emisiones acidificantes, algunos ecosistemas se recuperan con mayor lentitud que la prevista. En Estados Unidos todavía se encuentran aguas de superficie ácidas en el norte de la región central, las montañas Adirondack y al norte de las Apalaches. En Canadá, las zonas que reciben deposiciones ácidas más elevadas que sus concentraciones críticas se encuentran en provincias que son parte del Escudo Precámbrico canadiense. En Ontario, Quebec, Nueva Brunswick y Nueva Escocia las zonas de roca fuerte (granito) son más vulnerables toda vez que carecen de capacidad natural para neutralizar o amortiguar con eficacia la lluvia ácida. En términos históricos, niveles de industrialización más bajos, combinados con factores naturales como el movimiento hacia el este de los patrones climáticos y suelos con una mayor capacidad natural de amortiguamiento, han

logrado proteger los ecosistemas de las praderas occidentales de Canadá y Estados Unidos de los efectos de la lluvia ácida.

Aunque no se dispone de mapas similares para México, los efectos de la deposición húmeda son evidentes en los parques nacionales cercanos a la Ciudad de México, donde la lluvia ácida ha dañado bosques y suelos, y también en monumentos y edificaciones históricos de la propia Ciudad de México y otras localidades (véase el estudio de caso).

¿Cuáles son sus vínculos con otras cuestiones ambientales de América del Norte?

Las preocupaciones iniciales de los científicos en torno de los efectos de la deposición ácida en los bosques y el material de las edificaciones se han ampliado hoy en día para incluir los efectos de la contaminación acidificante en la biodiversidad y los ecosistemas costeros delicados.

Biodiversidad

Las diversas especies que habitan lagos, ríos y humedales difieren en sus habilidades para tolerar la acidez. La acidificación reduce sobre todo la variedad de la vida que puebla un lago y altera el equilibrio entre las poblaciones sobrevivientes. Los cambios en la combinación de especies que habitan cuerpos de agua también afectan a las aves y otras especies en niveles superiores de la cadena alimentaria, ya que ciertas clases de recursos alimenticios se tornan más escasos y otros más abundantes. Los científicos no pueden decir si las especies que han desaparecido de un lago acidificado retornarán algún día, aun si el pH regresara a sus niveles normales.

Ecosistemas costeros

Vinculado con la deposición ácida está el efecto de la deposición de nitrógeno en los ecosistemas de la costa, donde a menudo el nitrógeno se vuelve un factor limitante. Niveles más altos de nitrógeno en las aguas costeras pueden causar cambios significativos en esos ecosistemas. Alrededor de 60 por ciento de los estuarios de Estados Unidos sufre de abundancia anormalmente alta de nitrógeno, condición conocida como *eutrofización*. Entre los síntomas de la eutrofización se incluyen cambios en las especies dominantes de plancton (el recurso alimenticio básico para muchas clases de vida marina), lo cual puede causar una explosión de algas, niveles bajos de oxígeno en la columna de agua, muertes de peces y mariscos, y una cascada de alteraciones en la población en la parte alta de la cadena alimentaria. A su vez, los grados más altos de turbiedad en el agua resultantes de la mayor abundancia de algas pueden matar la vegetación acuática sumergida, que constituye un hábitat importante para muchas especies estuarinas de peces y mariscos. Aunque buena

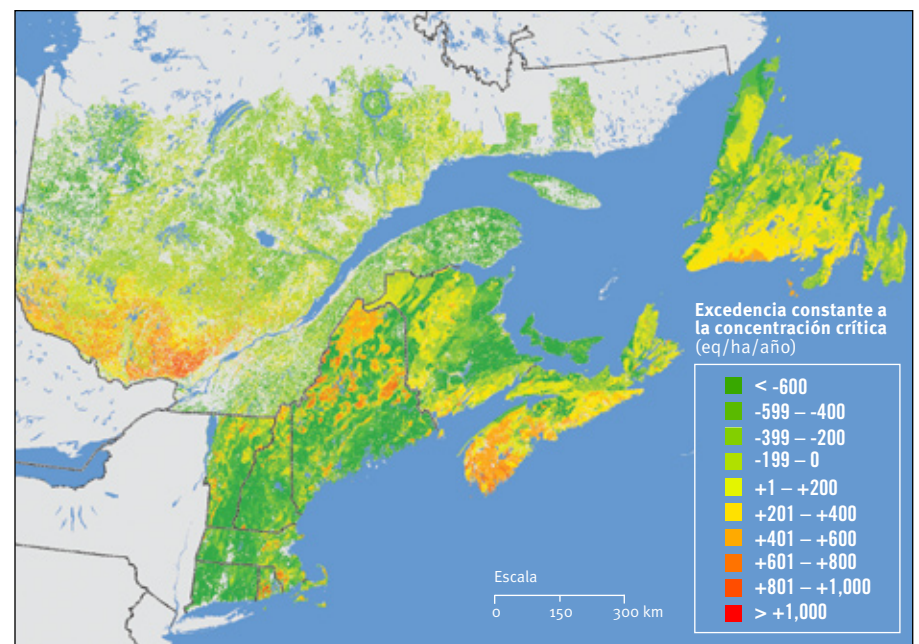
Estudio de caso – Vulnerabilidad de los bosques a la deposición de azufre y nitrógeno

Aunque las emisiones de azufre en Canadá y Estados Unidos han disminuido en virtud de los programas de control puestos en marcha, la emisión continua de compuestos de azufre y nitrógeno acidificantes representa una grave amenaza de largo plazo para la salud y la productividad de partes de los bosques del noreste de América del Norte. A esta conclusión se llegó mediante un estudio en el noreste estadounidense y el sureste de Canadá realizado por el Grupo de Cartografía Forestal de la Conferencia de Gobernadores de Nueva Inglaterra y Primeros Ministros del Este de Canadá (*Conference of New England Governors and Eastern Canadian Premiers Forest Mapping Group*).

Según el Grupo de Cartografía Forestal, de 1999 a 2003 la deposición atmosférica de azufre y nitrógeno excedió las concentraciones críticas en más de la tercera parte del área de estudio. En las provincias orientales de Canadá, las áreas forestales más vulnerables se ubican en el sur de Quebec, en particular en la parte baja de las Laurentianas, al norte del río San Lorenzo; en el sureste de Nueva Escocia, y al sur de Terranova. En Nueva Inglaterra las áreas forestales más vulnerables están en la zona montañosa y las áreas costeras, donde los suelos son pobres y la tasa de humedad es más baja con mayor demanda de nutrientes debido a la explotación más intensiva.

Con base en el monitoreo de bosques en Quebec y los efectos conocidos de la deposición ácida, este Grupo concluyó que las altas excedencias a la concentración crítica provocan —directa o indirectamente— un menor crecimiento de los bosques, así como el deterioro de la salud forestal.

Áreas forestales vulnerables a la deposición ácida en los estados de Nueva Inglaterra y provincias orientales de Canadá



Fuente: Grupo de Cartografía Forestal de la Conferencia de Gobernadores de Nueva Inglaterra y Primeros Ministros del Este de Canadá (*Conference of New England Governors and Eastern Canadian Premiers Forest Mapping Group*).

parte de los numerosos estuarios eutrofizados se ubica a lo largo del golfo de México y las costas del Atlántico medio, justo en las zonas con más alta deposición de nitrógeno, en realidad los estuarios eutróficos pueden encontrarse en todas las regiones de la línea costera de los Estados Unidos contiguos o limítrofes.